

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**STUDIUM MOŽNOSTÍ ZMATŇOVÁNÍ POVRCHU PRO
ÚČELY 3D SKENOVÁNÍ**

STUDY OF SURFACE COATING POSSIBILITIES FOR 3D SCANNING PURPOSES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Franke

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jakub Franke**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Studium možností zmatňování povrchu pro účely 3D skenování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro potřeby 3D skenování lesklých povrchů se tyto povrchy musí zmatňovat, nejčastěji se to u menších dílů provádí nástřikem z oxidu titaničitého a lihu. Podařilo se zkonstruovat a otestovat nástřikovou pistoli využívající pro tvorbu aerosolu ultrazvukový atomizér. Vytvořený aerosol ovlivňuje velké množství parametrů: tlak hnacího proudu vzduchu, tvar ústí pistole nebo umístění atomizéru. Doposud se také nepodařilo přesně popsat proces ulpívání aerosolu na zmatňovaném povrchu. Popsání tohoto procesu a prověření změn vstupních parametrů umožní dosáhnout ideální zmatňující vrstvy.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je popsat a objasnit proces nanášení zmatňujícího nástříku a vstupní parametry, které ovlivňují jeho výslednou podobu.

Dílčí cíle diplomové práce:

- definovat faktory ovlivňující nanášení zmatňujícího nástříku,
- navrhnout a realizovat úpravy nástříkové pistole,
- navrhnout a realizovat experimenty sloužící pro ověření ovlivňujících faktorů,
- vyhodnotit výsledky a stanovit závěry.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

PALOUŠEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNÝ, Josef BEDNÁŘ, Tomáš KOUTECKÝ a Filip DOKOUPIL. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. Optical Materials. 2015, 40(Febuary 2015), 1-9. DOI: 10.1016/j.optmat.2014.11.020.

HRUBOŠ, David, Tomáš KOUTECKÝ a David PALOUŠEK. An experimental study for determination of an application method and TiO₂ powder to ensure the thinnest matte coating layer for 3D optical scanning. Measurement [online]. 2019, 136(March 2019), 42-49 [cit. 2019-10-25]. DOI:

10.1016/j.measurement.2018.12.058. ISSN 02632241. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026322411831203X>

VALINASAB, Behzad, Maxym RUKOSUYEV, Jason LEE, Junghyuk KO a Martin B.G. JUN.

Improvement of Optical 3D Scanner Performance Using Atomization-Based Spray Coating. Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers [online]. 2015, 24(1), 23-30 [cit. 2019-1-25]. DOI: 10.7735/ksmte.2015.24.1.023. ISSN 2508-5093. Dostupné z:

<http://koreascience.or.kr/article/JAKO201509139906958.page>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně / Technická 2896/2 / 616 69 / Brno

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá zmatňujícími nástřiky pro účely 3D skenování, které jsou vytvářeny pomocí nástřikové pistole, jejíž základ tvoří vibrující membránový atomizér a ofukovací vzduchová pistole. Jako zmatňující materiál je použita suspenze oxidu titaničitého a alkoholu. Práce popisuje vliv procesních parametrů tohoto nanosového zařízení, které se přímo podílí na tvorbě matného nástřiku. Mezi ty lze zařadit například typ použité suspenze nebo nastavení vzduchové pistole. Součástí této práce byla také analýza charakteristik vytvořeného spreje, kdy bylo využito fázového Dopplerovského anemometru. Deponované nástřiky byly poté vyhodnocovány na základě měření jejich tloušťky a jejich vlivu na 3D skenování. Výsledkem práce bylo dosažení takové vrstvy povlaku, která měla tloušťku menší než $1\text{ }\mu\text{m}$ a zároveň která měla dobré optické vlastnosti pro samotné 3D skenování. Odchylka zachyceného mračna bodů vůči referenční rovině byla pod hodnotou $0,0011\text{ mm}$.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D skenování, zmatňování, atomizace, oxid titaničitý, fázová Dopplerovská anemometrie

ABSTRACT

This diploma thesis deals with matte coatings for 3D scanning purposes. The coatings are made with spray gun which uses a vibrating membrane atomizer and air blow gun. A suspension of titanium dioxide and alcohol is used as a coating material. This thesis describes the effect of the spray gun process parameters on the deposited coatings. These include, for example type of the coating suspension or setup of the blow gun. Phase Doppler Anemometry was used to measure spray characteristics. Deposited coatings were measured with profilometer and scanned with 3D scanner to study their thickness and effect on the results of 3D reconstruction. The result of this work was the coating with thickness below $1\text{ }\mu\text{m}$ with good optical properties for 3D scanning purposes. Standard deviation of the captured point cloud from the reference plane was below 0.0011 mm .

KEY WORDS

3D scanning, matte coating, atomization, titanium dioxide, Phase Doppler Anemometry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FRANKE, Jakub. *Studium možností zmatňování povrchu pro účely 3D skenování*. Brno, 2020, 135 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci *Studium možností zmatňování povrchu pro účely 3D skenování* jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Tomáše Kouteckého, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
2.1	Metody 3D rekonstrukce objektů	17
2.1.1	Aktivní triangulační metody	18
2.1.2	Problémy aktivních optických metod	19
2.2	Úprava povrchu pro zlepšení optických vlastností objektu	21
2.2.1	Pigmenty	24
2.3	Atomizační nástřiková pistole	26
2.3.1	Suspenze	27
2.3.2	Atomizace	31
2.3.3	Dynamika aerosolu	36
2.3.4	Geometrie nánosové pistole	40
2.3.5	Měření dynamiky a vlastností aerosolu	42
2.3.6	Střední průměry kapek ve spreji	44
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	45
3.1	Analýza problému	45
3.2	Analýza a zhodnocení poznatků z rešerše	45
3.3	Podstata a cíle diplomové práce	49
4	MATERIÁL A METODY	50
4.1	Postup řešení	50
4.2	Nástřiková sestava	51
4.2.1	Nánosová atomizační pistole	51
4.2.2	Úprava nánosové pistole	51
4.2.3	Automatizované nástřikové zařízení	55
4.2.4	Zdroj tlakového vzduchu	56
4.3	Studium suspenzí	57
4.3.1	Pigment	57
4.3.2	Nosné kapaliny	57
4.3.3	Stabilizační aditiva	58
4.3.4	Příprava suspenzí	58
4.3.5	Měření hustoty	61
4.3.6	Měření povrchového napětí	62
4.3.7	Měření dynamické viskozity	63

4.3.8	Sedimentační test	63
4.3.9	Měření shluků	64
4.4	Studium spreje	65
4.4.1	Fázová Dopplerovská anemometrie (PDA)	65
4.4.2	Analýza ústí nánosové pistole	67
4.5	Analýza nástříků – vliv procesních parametrů	70
4.5.1	Zmatňované objekty	71
4.5.2	Měření tloušťky nanesené vrstvy	71
4.5.3	Měření překrytí povrchu	72
4.5.4	3D skenování	73
4.5.5	Zpracování naskenovaných dat	74
4.6	Analýza nástříků – vliv suspenzí	74
4.7	Skenování reálných objektů	75
5	VÝSLEDKY	78
5.1	Sedimentační test	78
5.2	Měření shluků	79
5.3	Fyzikální vlastnosti suspenzí	82
5.4	Studium spreje	83
5.4.1	Výsledky PDA	84
5.4.2	Analýza ústí	93
5.4.3	Predikce režimu dopadu kapek	95
5.5	Analýza nástříků – vliv procesních parametrů	97
5.5.1	Překrytí povrchu	97
5.5.2	3D skenování	99
5.5.3	Tloušťka nanesené vrstvy	100
5.6	Analýza nástříků – vliv suspenzí	101
5.6.1	Překrytí povrchu	101
5.6.2	3D skenování a tloušťka povlaku	104
5.7	Skenování reálných objektů	109
6	DISKUSE	112
6.1	Nástřiková pistole	112
6.2	Vytvořený sprej	112
6.3	Vliv procesních parametrů na nástřik a 3D skenování	113
6.4	Vliv různých suspenzí na nástřik a 3D skenování	115

6.5	Ruční aplikace povlaku a skenování reálných součástí	116
7	ZÁVĚR	117
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	120
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	126
9.1	Seznam použitých zkratk	126
9.2	Seznam použitých symbolů a veličin	127
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	129
11	SEZNAM TABULEK	133
12	SEZNAM PŘÍLOH	135

1 ÚVOD

Metody skenování objektů ve 3D jsou v dnešní době obvyklou metodou rekonstrukce předmětů z reálného světa do digitálního prostředí. Základní rozdělení metod skenování může být provedeno například na základě interakce s objektem, kdy je možné uvažovat metody dotykové a bezdotykové. V případě kontaktních metod se uplatňují dotykové sondy umístěné na souřadnicovém měřicím stroji. Bezdotykové metody lze dále dělit na metody, které pracují s odrazem světla a na metody, které využívají průchodu záření. Skenery, které pracují s odraženým světlem, mohou být dále rozděleny z hlediska osvětlení scény na aktivní a pasivní.

Tato práce bude zaměřena na použití bezdotykových, aktivních optických metod. Tyto metody 3D skenování v dnešní době nacházejí široké uplatnění napříč průmyslovým i neprůmyslovým spektrem. Mohou být uplatněny v procesech kontroly kvality, v reverzním inženýrství, zdravotnictví, ale například také v oděvním, herním nebo filmovém průmyslu. Optické metody v porovnání s kontaktními metodami dokážou zachytit v určitém časovém horizontu mnohem větší část povrchu a jsou tedy v průmyslových aplikacích například kontroly kvality nebo reverzního inženýrství zajímavější právě z hlediska procesních časů. Jejich výhodou je i bezkontaktnost, která zajistí, že skenovaný povrch nepřichází do kontaktu s měřicí sondou. Optické metody však mají v porovnání s dotykovými sondami značnou nevýhodu, kdy jejich přesnost ovlivňuje řada faktorů. Je to například nastavení procesních parametrů skeneru, okolní osvětlení, drsnost povrchu a především pro tuto práci podstatný charakter skenovaného povrchu. Ukázalo se, že velmi lesklé, nebo naopak průhledné a průsvitné povrchy jsou pro běžné metody skenování výzvou. Skenování takovýchto povrchů může vést k získání mračna bodů, které obsahuje velké množství šumu, je nepřesné nebo je zcela nedostatečné.

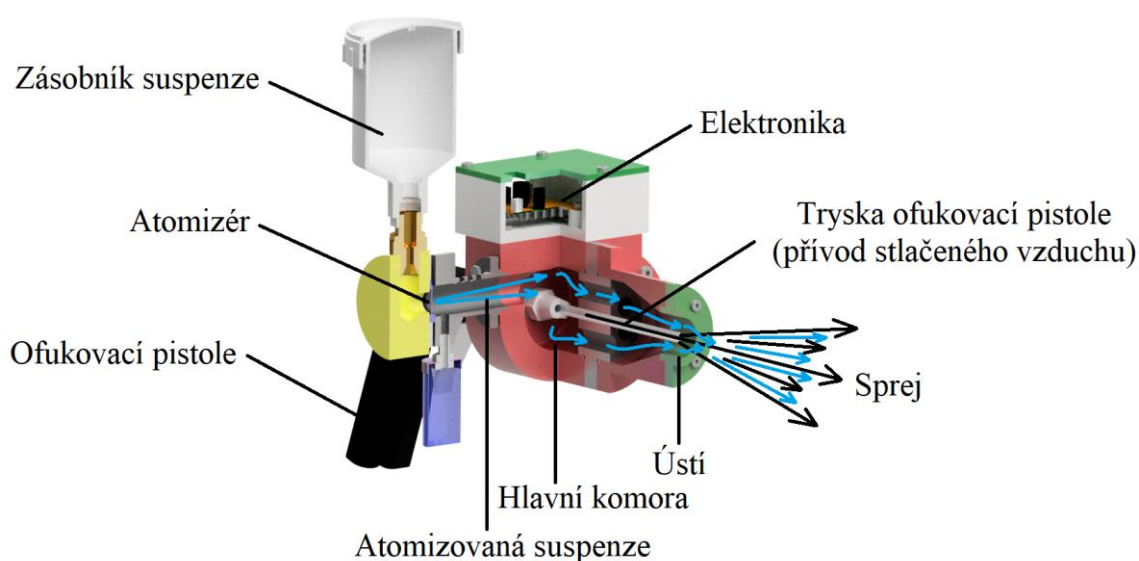
Takovýmto scénářům je možné předcházet dvěma způsoby. První způsob spočívá v použití speciálních skenovacích metod, které ve většině případů vyžadují specifický hardware a zásah do algoritmu zařízení. Druhý způsob, na kterém je postavena i tato práce, spočívá v aplikaci zmatňujícího pigmentu na problematický povrch. Povlak by měl na problematickém povrchu zajistit příznivý odraz světla, se kterým skener následně pracuje. Jako pigment se často používá prášek oxidu titaničitého. Výhodou nástřiku je jednoduchost jeho nánosu, a také to, že není potřeba upravovat skenovací zařízení. Metody zmatnění povrchu jsou tedy uplatnitelné pro práci s běžnými optickými 3D skenery. Hlavním nedostatkem zmatňujícího nástřiku je však to, že jeho použití může způsobit změnu geometrie objektu, na kterém je nanesen. Tloušťka nanesené vrstvy může být v řádech jednotek až desítek mikrometrů. Problém může nastat také například u ostrých rohových přechodů, kde se může pigment hromadit a způsobovat tvorbu rádiusů o velikosti až v řádech milimetrů. To může představovat problém u aplikací, kde je při skenování potřeba zachovat přesné rozměry měřeného objektu. Pro takovéto případy je snahou uplatnit metodu schopnou nanést dostatečně tenkou vrstvu zmatňujícího pigmentu,

kteřá by svojí tloušťkou neovlivnila přesnost rekonstrukce, ale zároveň by odstranila vliv problematického povrchu měřeného předmětu. Tj. velikost vrstvy povlaku by neměla přesahovat hodnotu vyšší než je hodnota přesnosti použitého skeneru.

Jako vhodná alternativa pro nános velmi tenkých zmatňujících povlaků se ukázala nástřiková pistole, která pro nános pigmentu využívá atomizér s vibrující membránou [1]. Princip použitého zařízení je znázorněn na Obr. 1-1. Jako zmatňující pigment se využívá oxid titaničitý, který je dispergován v ethanolu. Proces nánosu povlaku touto metodou však ovlivňuje řada parametrů, které se mohou odrazit v kvalitě nanesené vrstvy, a tudíž i v přesnosti skenování. Je to například koncentrace pigmentu v nosné kapalině, stabilita a vlastnosti suspenze (dispergovaného pigmentu v nosné kapalině), velikost částic pigmentu, rychlost hnacího proudu vzduchu, tvar ústí pistole nebo umístění pistole od zmatňovaného povrchu.

Hlavním cílem této práce je popsat a objasnit proces nanášení zmatňujícího nástřiku a vstupní parametry, které ovlivňují jeho výslednou podobu.

Hlavní motivací pro tento výzkum je možnost skenovat lesklé a průsvitné povrchy s dostatečnou přesností a kvalitou, kdy je snahou uplatnit metodu nánosu povlaku, která dostatečně zlepší optické vlastnosti skenovaného objektu, ale zároveň neovlivní přesnost rekonstrukce.

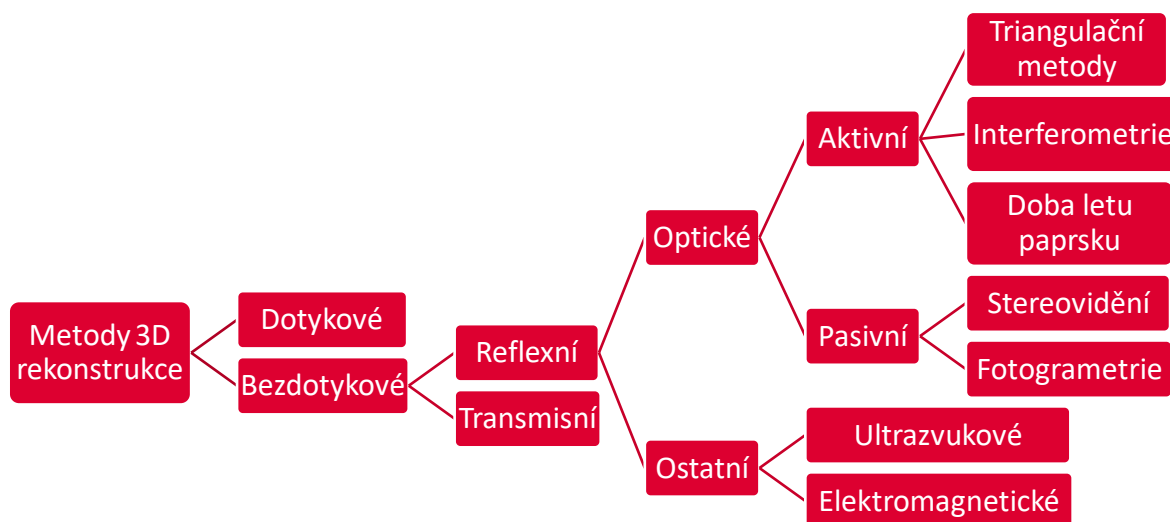


Obr. 1-1 Princip funkce atomizační nástřikové pistole

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Metody 3D rekonstrukce objektů

V současné době existuje mnoho metod jak zachytit a digitalizovat reálný objekt. Proces tzv. 3D skenování v současné době nachází široké uplatnění jak ve sféře průmyslu, tak v oblasti například zdravotnictví. Pro tuto práci je podstatná především oblast průmyslu, kdy jsou metody trojrozměrné rekonstrukce aplikovány v procesech kontroly kvality nebo při reverzním inženýrství. Stručné rozčlenění metod 3D rekonstrukce je uvedeno na Obr. 2-1. V případě dotykových metod je využíváno dotykové sondy umístěné na souřadnicovém měřicím zařízení (označovaném také jako CMM). Bezkontaktní zobrazovací techniky můžou být dále rozděleny na transmisní a reflexní, jak zmiňuje například Sansoni [2]. U transmisních technik je využíváno průchodu záření objektem (např. počítačová tomografie), zatímco u reflexních metod skenery pracují s odrazem určitého vlnění od objektu.

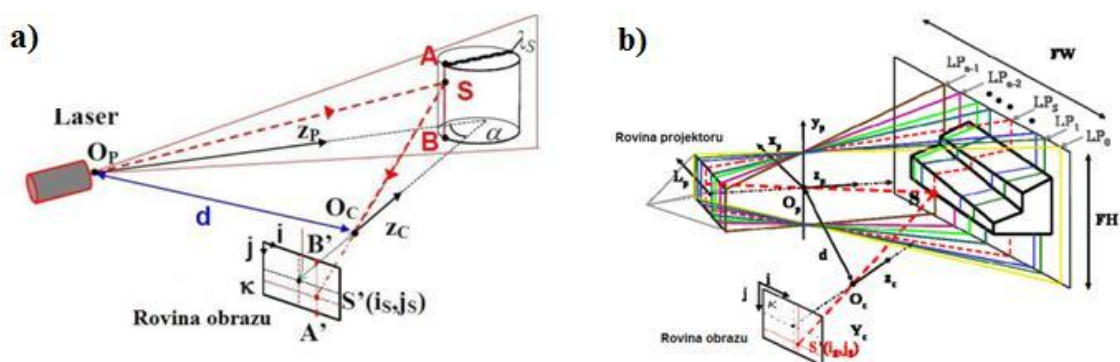


Obr. 2-1 Rozdělení metod 3D rekonstrukce – upraveno [2]

Pro účely této práce jsou podstatné především aktivní triangulační metody, o kterých bude krátce pojednáno v kapitole 2.1.1. V práci Martínez [3] jsou tyto metody porovnávány s technikami dotykovými a je zde uvedeno, že optické skenery umožní v určitém časovém horizontu zachytit mnohem větší podíl povrchu objektu než metody kontaktní. Tato výhoda se projeví především u objektů se složitými tvary. Nevýhodou optických metod však může být jejich přesnost, která je v porovnání s kontaktní sondou nižší a je ovlivněna mnoha faktory. Jak uvádějí například Zaimović-Uzunović a Lemeš [4, 5], tyto faktory mohou být barva skenovaného objektu, tvar objektu, jeho lesklost nebo nastavení procesních parametrů skeneru (například expoziční čas). U skenerů, které pracují na principu strukturovaného světla, hraje podstatnou roli i okolní osvětlení. Samotnou kapitolou je poté skenování objektů, které jsou průhledné, průsvitné nebo vykazují zrcadlový charakter. O možných skenovacích metodách, které umožňují takovéto povrchy zachytit, pojednává například práce Ihrke [6].

2.1.1 Aktivní triangulační metody

Tyto metody jsou založeny na principu triangulace, kdy je objekt nasvícen buď laserovým paprskem (laserové triangulační metody – viz Obr. 2-2a) nebo specifickým dvourozměrným vzorem (metody strukturovaného světla – viz Obr. 2-2b), který se odráží do kamery skeneru. Princip funkce skeneru popisuje například Sansoni [2]. Systém se dá znázornit trojúhelníkem, jehož vrcholy jsou tvořeny z emitoru světla, snímaného objektu a roviny obrazu. Jako rovina obrazu je uvažován CCD nebo CMOS snímač uvnitř kamery skeneru, na který odražené světlo dopadá. V systému je přesně definována orientace zdroje osvětlení, kamery a jejich vzájemná pozice. Díky známé vnitřní geometrii skeneru, je na základě trigonometrie možné dopočítat souřadnice jednotlivých bodů objektu. Tím vzniká požadovaný mrak bodů. V případě metody strukturovaného světla je pak možné získat informace o bodech v celé ploše a ne jen v jednom pruhu jako u laseru. U laserového skeneru pak musí docházet k relativnímu pohybu mezi součástí a skenerem, aby byla naskenována plocha.

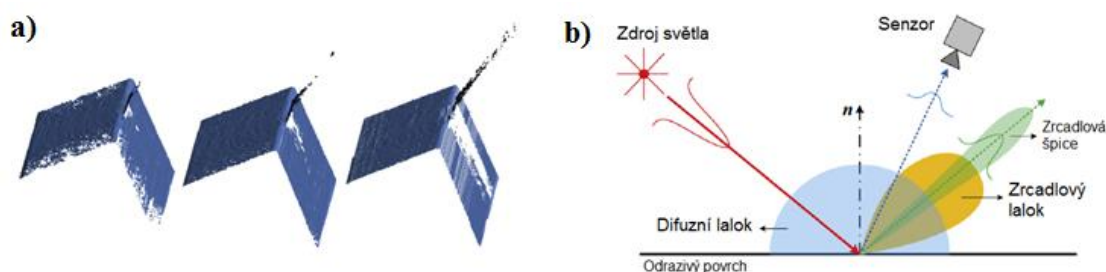


Obr. 2-2 a) Aktivní laserová triangulace b) Metoda strukturovaného světla- upraveno [2]

2.1.2 Problémy aktivních optických metod

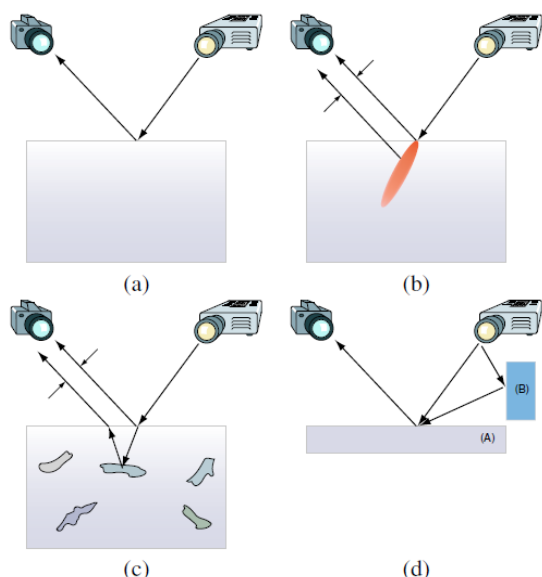
Jak již bylo zmíněno, při 3D skenování se ukazují jako velice problematické povrchy, které jsou lesklé, průhledné, průsvitné nebo pohltivé. Optické aktivní metody pracují s odrazem emitovaného osvětlení od měřeného povrchu, takže správný odraz je pro tyto skenery zásadní. V práci Wang a Feng [7] se zabývali problematickými odrazy na lesklých kovových površích, které mohou v procesu měření se skenerem s laserovým pruhem vést k tvorbě chybových bodů. Ty vznikají například na základě smíšené reflexe, vícenásobné reflexe nebo při použití dlouhých expozičních časů skeneru. Příklad chybových bodů vytvořených při skenování hrany lesklého objektu je uveden na Obr. 2-3a. Chybové body jsou v procesu rekonstrukce nežádoucí, jelikož zkreslují zachycenou geometrii.

Autoři zde také popisují jednotlivé komponenty odrazu světla, které se mohou u neprůhledného lesklého povrchu vyskytovat. Jednotlivé složky dělí na difuzní lalok, zrcadlový lalok a zrcadlovou špiči (viz Obr. 2-3b).



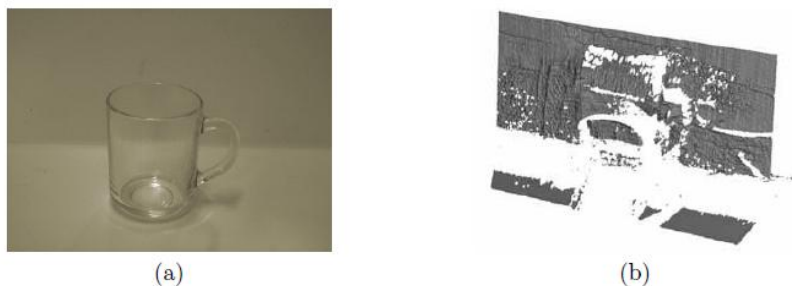
Obr. 2-3 a) Příklad chybových bodů při skenování lesklého kovového hranolu, b) Komponenty odraženého světla od lesklého kovového povrchu - upraveno [7]

Ve studii Chen [8] je popisováno chování strukturovaného světla na průsvitném povrchu. Odraz světla do kamery může být složen z přímého odrazu, rozptylu světla pod povrchem a případně i z odrazu od přiléhající plochy. Žádoucí je docílit přímého odrazu (Obr. 2-4a), avšak tento jev je ovlivněn vlastnostmi skenovaného povrchu (například drsnost). Rozptyl světla pod povrchem průsvitných objektů poté vede k posunutí pozorovaného světla pod povrch materiálu, což vede ke špatnému dopočtení hloubky (viz Obr. 2-4b). Chyba v dopočtu hloubky může být způsobena také přítomností částic ve struktuře průsvitného předmětu, kdy částice pod povrchem můžou odrážet více světla než samotný přímý odraz (Obr. 2-4c). Posledním typem odrazu světla ovlivňujícím skenování průsvitného povrchu může být přítomnost reflexe od přilehlé plochy (Obr. 2-4d), kdy je primární přímý odraz ovlivněn sekundárním odrazem od vedlejší plochy.



Obr. 2-4 Způsoby odrazu světla [8]

V případě zachycování průhledných objektů, poté běžné skenery většinou selhávají. Jak je uvedeno v práci Morris a Kutulakos [9], obtížnost rekonstrukce takovýchto povrchů je na základě kombinace jejich vzhledu, vnějšího tvaru a vnitřní struktury materiálu. Rekonstrukci ovlivňuje lom světla, vnitřní odrazy, absorpce světla a také rozptyl světla ve vnitřní struktuře povrchu. Příklad skenování průhledného skleněného objektu provedeného v práci Eren [10] je uveden na Obr. 2-5, kdy byl pro rekonstrukci využit bezkontaktní laserový skener Minolta VI-910.



Obr. 2-5 Rekonstrukce průhledného skleněného objektu běžnou metodou skenování, a) Skenovaný objekt, b) Výsledek skenování [10]

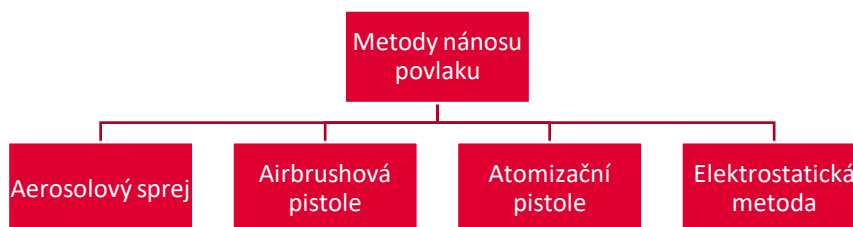
Souhrnné rozčlenění chování světla na různých typech povrchů ve své práci nabízí Ihrke [6], viz Tab. 2-1. Odtud je patrné, že u neprůhledných povrchů záleží na drsnosti povrchu. Se snižující se drsností povrchu se projevuje více zrcadlový odraz na úkor odrazu difuzního. V případě povrchů průhledných a průsvitných je odraz světla mnohem komplexnější a zrcadlový odraz může být doprovázen rozptylem, nebo dokonce i absorpcí světla.

Tab. 2-1 Chování světla na různých typech povrchů [6]

object type	surface / volume type	class	image formation
opaque	surface, rough	①	diffuse or near diffuse reflectance
	surface, glossy	②	mixed diffuse and specular reflectance
translucent transparent	surface, smooth	③	ideal or near ideal specular reflectance
	surface, sub-surface scattering	④	multiple scattering underneath surface
	surface, smooth	⑤	ideal or near ideal specular refraction
	volume, emission / absorption	⑥	integration along viewing ray
	volume, single scattering	⑦	integration along viewing ray
inhomogeneous	volume, multiple scattering	⑧	full global light transport without occluders
	mixed scenes, containing many / all of the above	⑨	full global light transport

2.2 Úprava povrchu pro zlepšení optických vlastností objektu

Jeden z přístupů, jak zachytit problematický povrch běžnými aktivními skenovacími metodami, je založen na nanesení dočasného tenkého zmatňujícího povlaku na skenovaný povrch. Ten zlepšuje odraz světla a umožňuje tak použití konvenčních skenerů. Tímto přístupem se bude zabývat i tato práce. Má však nevýhodu v tom, že mění rozměry skenovaného objektu. Je tedy snahou nanést co nejtenčí vrstvy, které svou velikostí budou pod hodnotou přesnosti použitého skeneru. Stručné rozčlenění metod pro nános povlaků na skenovaný objekt je uvedeno na Obr. 2-6.

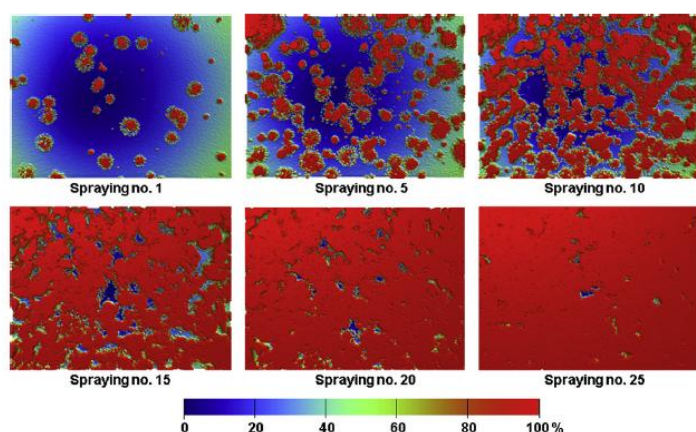


Obr. 2-6 Přehled metod nánosu povlaku na skenovaný objekt

V práci Maeng a Lee [11] se zabývali využitím metody elektrostatického nánosu. Proces nánosu je založen na nabití matného prášku záporným nábojem, zatímco zmatňovaný povrch je uzemněn. Pro samotný nános autoři využili proudu stlačeného vzduchu. Výhoda elektrostatické metody spočívá především v možnosti nánosu koherentní vrstvy, kdy se vrstva od určité tloušťky nezvyšuje vlivem odpuzivých sil mezi nabitými částicemi pigmentu. Problém této metody však nastává u nevodivých objektů, jako je například sklo nebo pryž, u kterých je tato metoda prakticky nepoužitelná.

Optické vlastnosti skenovaného objektu je možné upravit také pomocí komerčních sprejů. Jednotlivé typy sprejů, které se pro účely 3D skenování využívají, jsou uvedeny například na webu Artec3D [12]. Zde odkazují například na sprej Cyclododecane Spray od společnosti Kremer Pigmente, který se dokáže po nanesení do několika hodin odpařit. Při neopatrném nánosu však u tohoto spreje může docházet k tvorbě vloček, a to především pokud má uvažovaný objekt malé geometrické přechody. Další sprej, který zde zmiňují je sprej Krylon Dulling Spray od společnosti Krylon, který zanechává texturu téměř bez změny díky nánosu antireflexní vrstvy, která má téměř průhledný charakter. Jeden z odkazů je i na sprej společnosti Helling GMBH [13], který by měl dle výrobce poskytovat nános od 2 μm . Na trhu se také objevuje sprej Aesub Blue [14], který by měl být schopný nabídnout tloušťku od 5 do 15 μm , v závislosti na počtu nanesených vrstev. Výhodou tohoto spreje je jeho schopnost po několika hodinách samovolně zmizet. Doba odpaření je v tomto případě závislá například na okolní teplotě, proudění okolního vzduchu nebo také například na tloušťce aplikované vrstvy.

Další metodou, jak nanášet zmatňující povlak, může být airbrushová pistole. U té bylo v případě výzkumů [15, 16] použito pro tvorbu spreje suspenze pigmentu TiO_2 a ethanolu. Porovnáním této metody s konvenčním křídovým sprejem se zabýval Paloušek [15], kdy byl zkoumán vliv zmatňujících nástřiků na přesnost optického 3D skenování. První experiment v této práci se zabýval měřením odrazivosti, při kterém bylo využito ruční aplikace křídového matněního spreje od společnosti Helling GMBH. Jednotlivé vrstvy byly nanášeny na leštěné křemíkové destičce. Intenzita odraženého světla v závislosti na počtu nanesených vrstev je znázorněna na Obr. 2-7. Odtud bylo patrné, že pro docílení 100% intenzity odrazu napříč téměř celou sledovanou plochou, bylo potřeba většího počtu nanesených vrstev.



Obr. 2-7 Intenzita odraženého světla pro různé počty nanesených vrstev [15]

Druhý experiment v tomto článku byl zaměřen na měření odchylek při skenování dvou referenčních objektů (válcová díra a kulový etalon), kdy bylo pro skenování využito 3D skeneru Atos Triple Scan. Zde bylo využito nástřiku z komerčního křídového spreje a nánosu oxidu titaničitého pomocí airbrushové pistole. Experimenty ukázaly, že povlaky

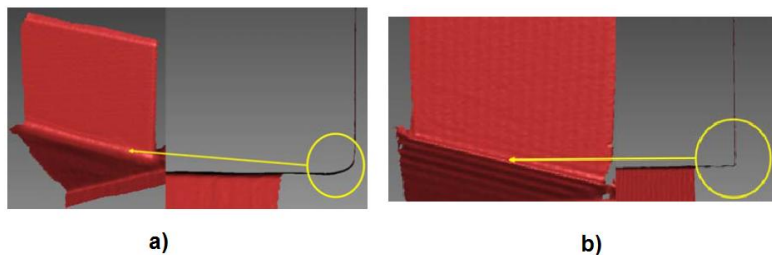
nanesené aibrusovou pistolí s titanovým práškem dosahovaly oproti křídovému spreji vrstvy přibližně desetkrát menší (rozsah křídového povlaku 44 μm , rozsah titanového povlaku 5 μm).

Valinasab [17] pro zlepšení optických vlastností skenovaného objektu využil techniku nánosu povlaku postavenou na principu atomizace. Použité zařízení se skládalo z atomizéru, hnacího proudění a trysky ústí. Pro tyto účely bylo využito kolizního nebulizéru, který rozbíjel roztok na malé kapky. Vytvořené kapky byly následně unášeny hnacím médiem a skrze trysku opouštěly nánosovou pistolí. Jako povlak byla využita bílá akrylová barva, která byla rozmíchána ve vodě v poměru 1:6. Pro měření tloušťky výsledné nanesené vrstvy autoři využili profilometru, kdy byla jako referenční povrch použita skleněná destička. Ukázalo se, že při nanesení jedné vrstvy se tloušťka povlaku pohybovala okolo 50 nm. Při nánosu 10 vrstev byla síla povlaku přibližně 400 nm (viz Obr. 2-8).



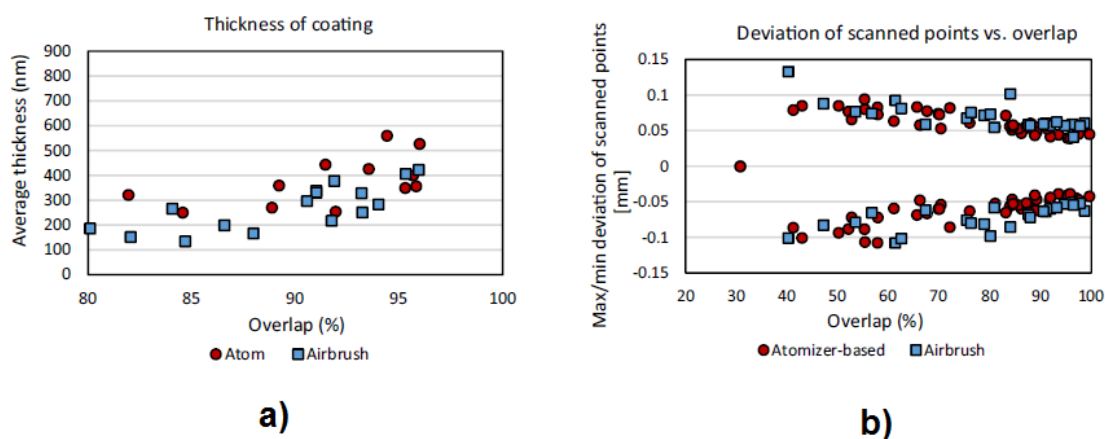
Obr. 2-8 Tloušťka povlaku naneseného pistolí na bázi atomizéru - upraveno [17]

Valinasab [17] tyto výsledky konfrontoval s nánosem z aerosolového spreje, kdy se ukázalo, že pro jeden průchod spreje byla vrstva okolo 12 μm . Jednotlivé vzorky byly skenovány skenerem se strukturovaným světlem (s přesností 120 μm) a laserovým skenerem (s přesností 200 μm). Při analýze skenů se ukázalo to, že aby bylo dosaženo dobré kvality naskenovaných dat je potřeba atomizační pistolí nanést 8 až 10 vrstev. Nejlepší naskenovaná data byla v případě použití aerosolového spreje. Zásadní výhoda atomizační pistole se však projevila při skenování geometrických prvků skenovaného objektu. V tomto případě komerční sprej způsoboval zkreslení geometrie, které se projevilo tvorbou rádiusu o poloměru přibližně 2 mm (viz Obr. 2-9).



Obr. 2-9 Porovnání naskenovaných dat a) Při nanesení povlaku sprejem, b) Při nanesení povlaku pistolí s atomizérem - upraveno [17]

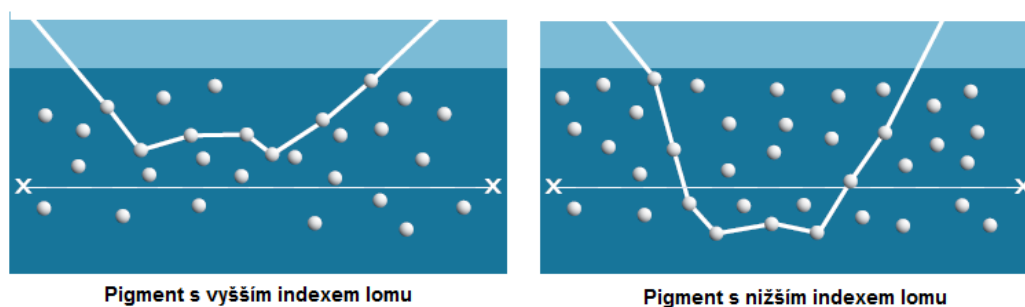
Porovnáním airbrushové a atomizační techniky zmatnění povrchu se zabýval Hruboš [16]. Pro nános bylo v obou případech využito suspenze prášku TiO_2 a ethanolu. V případě atomizační pistole bylo užito atomizéru s vibrující membránou, který suspenzi rozbíjel na mlhu, která byla následně unášena stlačeným vzduchem. Jako airbrushová pistole byla využita Iwata HP-C Plus. Obě tyto metody byly schopny nabídnout výsledky, které se od sebe zásadně nelišily (viz Obr. 2-10). Autor také zmiňuje, že pro dostatečný zmatňující efekt je potřeba alespoň 80% překrytí, kdy se odchylka naskenovaných dat dostávala na úroveň okolo $\pm 0,05$ mm (viz Obr. 2-10b). V tomto případě byly jako měřené objekty využity lesklé křemíkové destičky. Grafy na Obr. 2-10 byly získány pro titanový prášek Kronos 2066 s primární velikostí částic 350 nm.



Obr. 2-10 Porovnání povlaků vytvořených atomizační a airbrushovou pistolí a) Velikost nanesené vrstvy v závislosti na překrytí, b) Odchylka naskenovaných bodů v závislosti na překrytí povrchu - upraveno [16]

2.2.1 Pigmenty

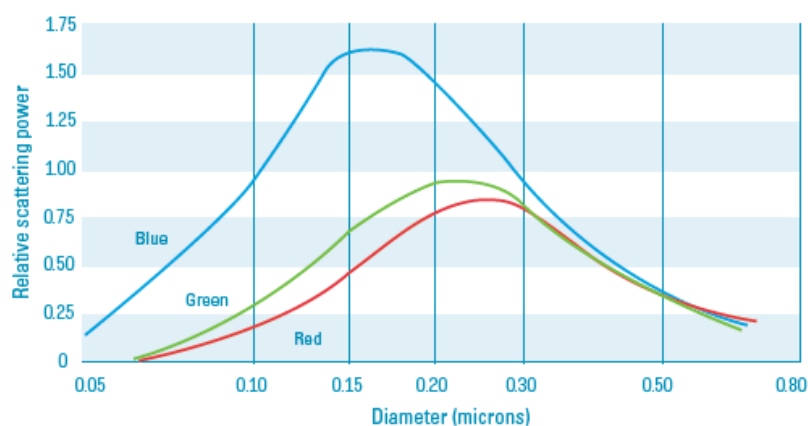
Pro účely zmatňování povrchu je třeba volit materiál, který má dobrý rozptyl světla. Vhodné jsou materiály označované jako bílé pigmenty, kterými podle Brauna [18] označujeme částice, které mají index lomu vyšší jak 2. Důležitou vlastností by měl být vysoký index lomu nebo také například stabilita, jak uvádí ve svém produktovém listu firma Chemours [19]. Vyšší index lomu znamená, že se světlo láme mnohem ostřeji (viz Obr. 2-11). Film s větším indexem lomu tedy neumožní světlu prostoupit tolik do hloubky dané vrstvy, což je vlastnost, která je při skenování povrchu s povlakem očekávána.



Obr. 2-11 Pigment s vyšším a nižším indexem lomu - upraveno [19]

Prášky oxidu titaničitého

Výše zmíněné vlastnosti dobře splňuje oxid titaničitý (TiO_2). TiO_2 lze získat ve dvou morfologiích, a to ve formě rutilové (index lomu 2,7) a anatasové (index lomu 2,5). Rutilová forma má lepší rozptylové vlastnosti a je také schopna pohlcovat více UV záření [18]. Firma Chemours [19] uvádí, že pro efektivní rozptyl světla je potřeba volit správnou velikost primárních částic pigmentu. Doporučená velikost je menší jak polovina vlnové délky používaného světla. Vliv velikosti rutilových TiO_2 částic na rozptyl světla je uveden na Obr. 2-12.



Obr. 2-12 Závislost relativního rozptylu světla na velikosti TiO_2 částic [19]

Z Obr. 2-12 je patrné, že největší míru relativního rozptylu má modré světlo při velikosti částic okolo $0,15 \mu\text{m}$. U zeleného světla je největší rozptyl pro částice s rozměrem okolo $0,2 \mu\text{m}$ a pro červené je největší rozptyl u částic s průměrem $0,25 \mu\text{m}$.

Ostatní bílé pigmenty

Braun [18] uvádí i další bílé pigmenty, kterými lze TiO_2 nahradit. Mohou to být například litopon, sulfid zinečnatý nebo oxid zinečnatý. Tyto pigmenty jsou však považovány za zastaralé z hlediska vyšší ceny a především kvůli nižšímu krytí. Dalším možným pigmentem je například i olověná běloba, avšak ta je považována za příliš toxickou. Tab. 2-2 nabízí porovnání indexů lomu vybraných bílých pigmentů.

Tab. 2-2 Porovnání bílých pigmentů - upraveno [18]

Bílý pigment	Index lomu
Oxid titaničitý (anatas)	2,5
Oxid titaničitý (rutil)	2,7
Oxid zinečnatý	2,0
Sulfid zinečnatý	2,4
Olověná běloba	1,9-2,1

2.3 Atomizační nástřiková pistole

Tato práce je zaměřena na využití nánosové pistole, která byla sestrojena v rámci diplomové práce Hruboš [1] a která pro svoji činnost využívá atomizéru s vibrující membránou. Při procesu nánosu povlaku touto metodou je potřeba zvážit jednotlivé uzly, které se v systému vyskytují a které by mohly mít vliv na jeho výslednou podobu. Rozčlenění jednotlivých uzlů je znázorněno na Obr. 2-13. V tomto případě můžou být ovlivňující faktory stabilita suspenze, atomizace zmatňující suspenze a také dynamika aerosolu, která definuje dopad kapek spreje na zmatňovaný povrch.



Obr. 2-13 Uzly nánosové pistole, které mohou ovlivnit nanesený zmatňující povlak

2.3.1 Suspenze

Suspenze s částicemi o velikosti v řádech stovek nanometrů, lze také označovat jako koloidní nebo lyofobní disperze.

Stabilita suspenze

Dle prací Hruboš [1, 16] je potřeba zajistit dobré promísení titanové běloby v nosné kapalině. Hruboš zmiňoval, že nestabilní suspenze se může negativně projevovat v celém procesu nástřiků zmatňujících povlaků.

Jak uvádí Schramm [20], lyofobní disperze nejsou termodynamicky stabilní. V některých případech se jejich nestabilita může projevit sedimentací, agregací nebo koalescencí. V případě sedimentace vznikají oddělené vrstvy, které mají různé koncentrace rozptýlených fází. Ve fázi s vyšší koncentrací poté může docházet k agregaci. Agregace je spojení dispergovaných částic dohromady, kdy se celková plocha de facto nemění. Koalescence označuje slítí dvou fází, kdy dochází k vytvoření jedné částice se zredukovanou plochou. Stabilita disperze vůči agregaci nebo koalescenci závisí na interakci jednotlivých částic. Na částice působí odpudivě elektrostatické síly a přitažlivě síly Van der Waalsovy. Schramm uvádí, že nejjednodušším případem jak dosáhnout koloidní stability, je stabilizace rozptýlených částic odpudivými silami. Druhým způsobem stabilizace může být stabilizace sterická, která je založena na adsorpci vysoko-hmotnostních polymerů na povrchu dispergovaných částic.

Widegren a Bergström [21] se ve své práci zabývali elektrostatickou stabilizací titanového prášku (velikost ≈ 30 nm) v ethanolu. Elektrokinetické chování a stabilita daného systému byla brána jako funkce operačního pH a koncentrace soli. Operační pH bylo upravováno za pomoci kyseliny octové, kyseliny chlorovodíkové nebo hydroxidu lithného. Chlorid lithný byl použit pro kontrolu iontové síly. V této práci bylo ukázáno, že stabilita je závislá na iontové síle. Systém agregoval v případě iontové síly $> 10^{-3}$ M. Dlouhotrvající stabilita byla v případě iontové síly $\leq 10^{-4}$ M, kdy byl zeta potenciál dostatečně velký (40-50 mV). Při nižších iontových silách byla předpokládaná stabilita, když bylo operační pH dostatečně daleko od izoelektrického bodu (tj. od bodu, kde je zeta potenciál nulový).

Kuo [22] se ve své práci zabýval volbou vhodného disperzantu pro TiO_2 nanoprášky (velikost ≈ 10 -15 nm) dispergované v organických suspenzích (rozpouštědlo etyl acetát). Byly vybrány 4 typy disperzantů, a to oleyl alkohol (OLA), kyselina olejová (OAh), oleylamin (OA) a oleyl fosfát (OP), které mají různé funkční skupiny (hydroxylovou, karboxylovou, amino a fosforovou). Tyto látky byly analyzovány, jak dokážou pomoci při dispergaci TiO_2 částic. Experimentální výsledky ukázaly, že látky na bázi fosforu a amino byly efektivnější než ty hydroxylové a karboxylové. Tento rozdíl byl dán rozdílnou interakcí s oxidem titaničitým a také rozdílným disperzním mechanismem.

Yaremko [23] se zabýval stabilitou a redispergací TiO₂ částic (průměrná velikost 0,23 μm) ve vodných roztocích. Stabilita disperze byla zkoumána při různých pH. V této práci odkazují na výpočet agregačního koeficientu S (viz rovnice (1)).

$$S = \frac{|V_A|}{V_B + V_C} \quad (1)$$

kde V_A je energie přitažlivosti mezi částicemi, V_B je kinetická energie Brownova pohybu a V_C je změna potenciální energie částic jejich pohybem vlivem přitažlivých sil. Pokud je $S < 1$ částice zůstanou odděleny, pokud je $S > 1$ částice začínají agregovat. Agregáty by poté měly vznikat, když je velikost částic mezi rozměry d_1 a d_2 .

$$d_1 = \frac{24H_0kT}{A} \quad (2)$$

$$d_2 = \left(\frac{6kT}{\pi g \rho H_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

kde H_0 je rovnovážná vzdálenost mezi částicemi, k je Boltzmannova konstanta, T je teplota, A je Hamakerova konstanta, g je gravitační zrychlení a ρ je hustota částic.

Yaremko následně zmiňuje, že redispergace neumožňuje kompletní rozbití agregátů a i při pH 11-12 (nejvyšší koloidní stabilita) byly nalezeny agregáty, které obsahovaly 2-4 částice.

Woo [24] se zabýval sedimentací nanočástic oxidu titaničitého (velikost ≈ 300 nm) v různých nosných kapalinách (voda, metanol, ethanol a isopropylalkohol). Výsledky ukázaly, že titanové částičky nejvíce sedimentují u vody, metanolu a ethanolu. Stabílní suspenze byla naopak vytvořena při použití isopropylalkoholu jako nosné kapaliny. Naměřený zeta potenciál poté ukázal rozdíl ve stabilitě systémů a jeho závislost na migrační rychlosti částic (viz Tab. 2-3).

Tab. 2-3 Vlastnosti různých nosných kapalin suspenze s nanočásticemi TiO₂ [24]

Nosná kapalina	Zeta potenciál (mV)	Migrační rychlost částic (μm·min ⁻¹)
Voda	-26,05	6,15
Metanol	-26,11	12,53
Ethanol	-28,66	6,51
Isopropylalkohol	-45,39	0,18

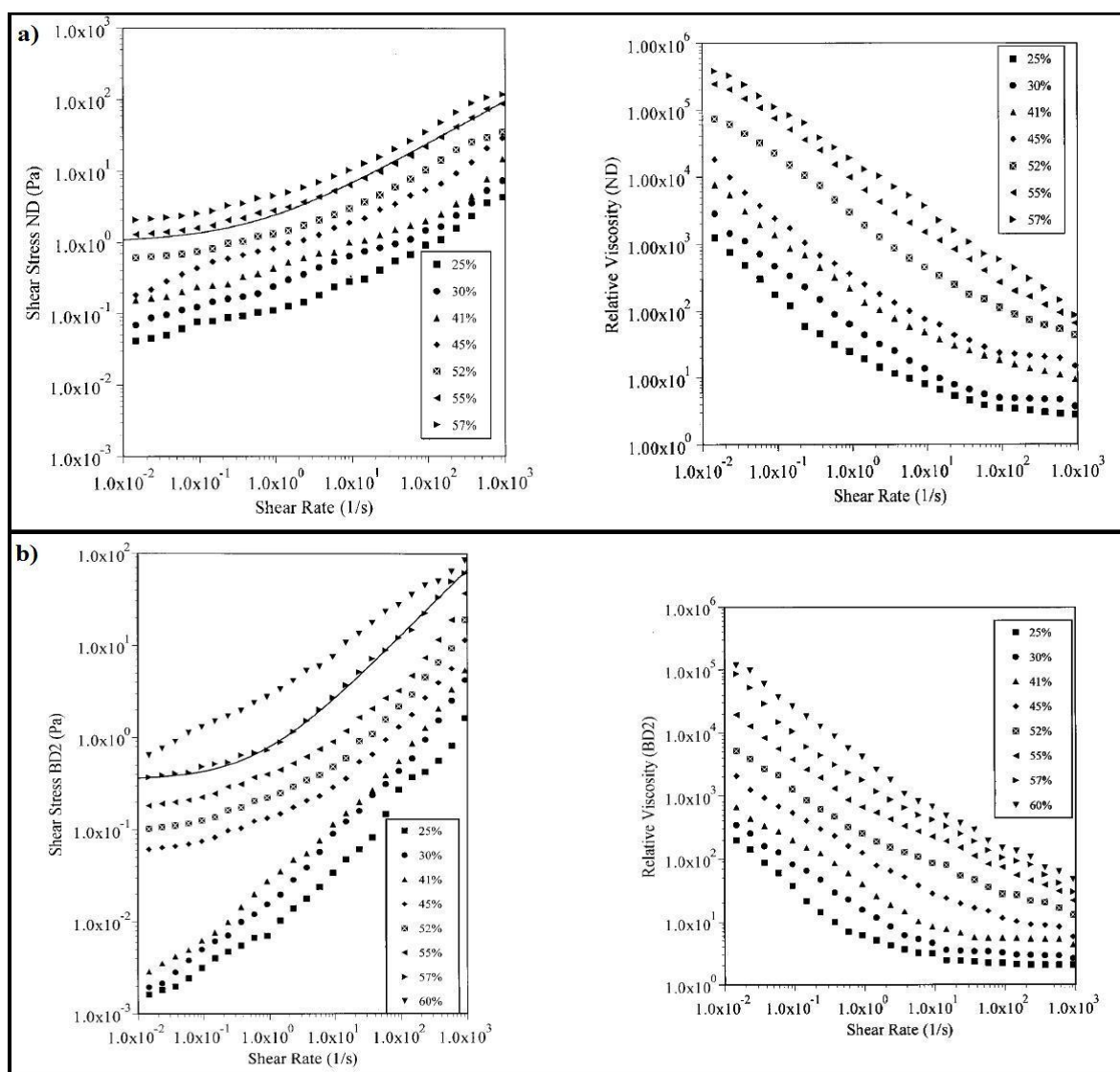
Farrokhi-Rad a Ghorbani [25] se zabývali stabilitou nanočástic v různých alkoholových nosných kapalinách (metanol, ethanol, isopropylalkohol a butanol) s příměsí disperzantu Triethanolaminu (TEA). Koloidní stabilita suspenze s přidáním a bez přidání TEA zde byla zkoumána na základě měření zeta potenciálu, sedimentace, pH a elektrické vodivosti.

Výsledky ukázaly, že stabilita titanových částic se zvyšovala se vzrůstající molekulární velikostí nosné kapaliny (tj. od metanolu k butanolu), a to i navzdory klesajícímu zeta potenciálu. TEA se poté ukázal jako účinný v isopropylalkoholu a butanolu, avšak u metanolu a ethanolu stabilitu naopak snižoval.

Vlastnostmi suspenzí s TiO_2 pro účely materiálového tisku se zabýval Svoboda [26]. V této práci bylo uvažováno 60 vzorků suspenzí oxidu titaničitého, kdy byly uvažovány dva typy TiO_2 . První typ byla vodná disperze Tiodispers NA-AS s obsahem 35 % TiO_2 a druhý typ byla prášková forma s primární velikostí částic 21 nm (Aeroxid). Jako nosné kapaliny zde byly uvažovány cyklohexan, toluen, metanol, ethanol, butanol, i-butanol, hexanol a propanol. V této práci byl také experimentálně ověřován vliv různých aditiv na stabilitu systému. Mezi aditivity byly organické i anorganické kyseliny a povrchově aktivní látky. Z 60 vzorků zde bylo vizuálně vybráno 10 nejstabilnějších kandidátů, které byly dále zkoumány. Z vybraných 10 vzorků byla nejstabilnější suspenze (z hlediska rychlosti sedimentace) vytvořena z vody s dispergovaným Tiodispers při pH 4, které bylo ovlivněno kyselinou chlorovodíkovou (rychlost sedimentace $8,5 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Nejméně stabilní suspenze (z vybraných 10 vzorků) byla v případě směsi cyklohexanu s dispergovaným Aeroxidem při přidání 1,1 ml kyseliny nonanové (rychlost sedimentace $150 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). V případě směsi s alkoholovou nosnou kapalinou dopadla (z vybraných 10 vzorků) nejlépe suspenze Aeroxidu v hexanolu s příměsí kyseliny palmitové (rychlost sedimentace $14,4 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a ethanolová suspenze s dispergovaným Tiodispers s příměsí kyseliny nonanové (rychlost sedimentace $30 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Vliv velikosti dispergovaných částic

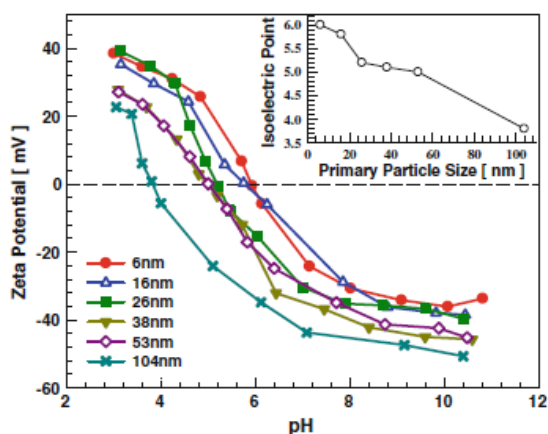
Luckham a Ukeje [27] se zabývali vlivem polydisperzity částic na reologii disperzního systému. Zde uvažovali vodné roztoky s polystyrenovými latexovými částicemi o střední velikosti 400 nm s různou standardní odchylkou ve velikosti ($\pm 42,4$, ± 76 , ± 171). Částice v tomto případě stabilizovali za pomoci kopolymeru. Výsledky hovořily o tom, že míra rozptylu velikosti částic má na reologické vlastnosti značný vliv. Všechny výsledky měření smykového napětí v závislosti na smykovém spádu vykazovaly pseudoplastické chování s mezí tečení. Ve všech případech byl také patrný nárůst smykového napětí a relativní viskozity při vyšších koncentracích latexových částic. Příklad závislosti smykového napětí a relativní viskozity na smykovém spádu pro různé koncentrace částic o velikosti 400 nm s rozptylem velikostí $\pm 42,4$ a ± 171 nm je uveden na Obr. 2-14. V případě Obr. 2-14a i Obr. 2-14b (vlevo) je patrné, že s narůstající podílem pevné fáze v suspenzi se zvyšuje i hodnota smykového napětí meze tečení. Relativní viskozita se dle obrázku Obr. 2-14a i Obr. 2-14b (vpravo) s nárůstem smykového spádu snižuje. Z těchto grafů je také patrné, že pro větší koncentrace pevných částic je pokles relativní viskozity strmější.



Obr. 2-14 Závislost smykového napětí a relativní viskozity na smykovém spádu pro různé koncentrace latexových částic a) Odchylka velikosti částic ± 42.4 nm b) Odchylka velikosti částic ± 171 nm – upraveno [27]

Suttiponparnit [28] se ve své práci zabýval vlivem velikosti povrchu, velikostí primárních částic a krystalické fáze na vlastnosti disperze nanočástic oxidu titaničitého. Je zde zmíněno, že povrchový náboj a hydrodynamický průměr jsou jedny z nejdůležitějších parametrů. Z této studie plynou závěry, že pH a iontová síla má důležitou roli na zeta potenciál a hydrodynamický průměr disperze. Z této práce plyne také to, že čím byly primární částice anatasového TiO_2 menší, tím více se izoelektrický bod IEP (IEP - případ, kdy je zeta potenciál nulový) posouval k vyšším hodnotám pH (viz Obr. 2-15). V oblasti IEP mezi částicemi začínají převládat přitažlivé Van der Waalsovy síly, což vede ke shlukování částic. Pokud je pH roztoku dostatečně daleko od oblasti IEP, zvýší se absolutní hodnota zeta potenciálu, což zapříčiní, že se zvýší vliv odpuzivých elektrostatických sil. Díky tomu se potlačí agregace a hydrodynamická velikost částic se zmenší. Výsledky v grafu na Obr. 2-15 byly získány ze suspenze částic TiO_2 dispergovaných v deionizované vodě. Koncentrace částic zde byla $50 \mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$

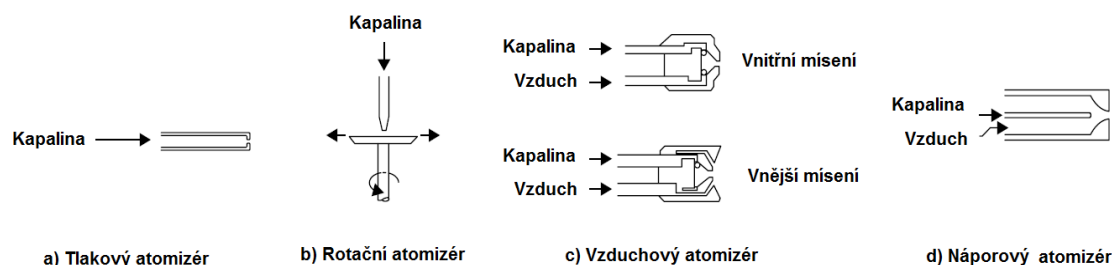
a iontová síla byla 0,001 M. pH bylo měněno od 3 do 11 za pomoci HCl, NaCl a NaOH pro každou velikost částic.



Obr. 2-15 Vliv velikosti primárních částic anatasového TiO₂ na zeta potenciál disperze při změně pH [28]

2.3.2 Atomizace

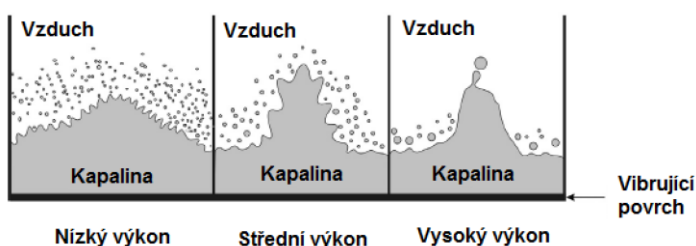
Atomizace je proces, kdy je kapalina přeměňována na aerosol. Obecné rozdělení atomizérů, provedli například autoři Lefebvre a McDonell [29], kdy tato zařízení dělí na tlakové (Obr. 2-16a), rotační (Obr. 2-16b), vzdušné (Obr. 2-16c), náporové (Obr. 2-16d) a ostatní. Tlakové atomizéry vytvářejí aerosol na základě proudění media skrze malý otvor s pomocí tlakové energie. Ta následně udává rychlost atomizovanému mediu. Rotační atomizéry pracují s rychle rotujícím diskem, do kterého je přiváděna kapalina, která následně vysokou rychlostí vychází z obvodu atomizéru. Vzdušné atomizéry pro svoji činnost využívají vzduchu, který proudí vysokou rychlostí a je možné je dále rozdělit na atomizéry s vnitřním a vnějším mísením. V případě vnitřního mísení se tekutina a plyn mísí uvnitř zařízení ještě před jejich výstupem. U externích atomizéru dochází k mísení plynné a kapalné fáze naopak až u výstupu. Náporové atomizéry poté pracují na podobném principu jako vzdušné. Jediný rozdíl je v tom, že vzdušné atomizéry pracují s velkým množstvím proudícího media s nižší rychlostí.



Obr. 2-16 Atomizéry - upraveno [29]

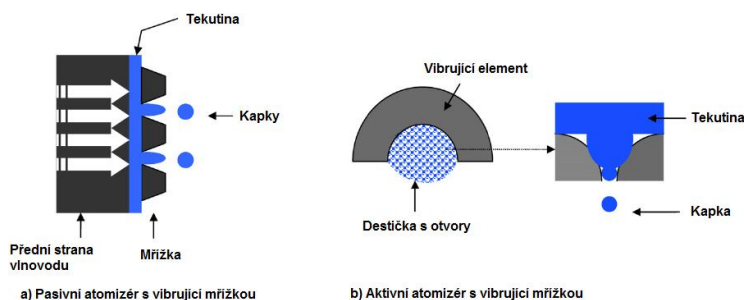
Pro tuto práci jsou však podstatné atomizéry, které autoři Lefebvre a McDonell zahrnuli do kategorie ostatních typů. Jsou to atomizéry ultrazvukové a především pro tuto práci podstatné atomizéry s vibrující mřížkou (membránou).

Jak uvádí například Avvaru [30], princip ultrazvukové atomizace je založen na rozbití kapaliny na malé kapičky pomocí vibrujícího povrchu pod hladinou kapaliny. Frekvence kmitání dosahují hodnot vyšších jak 20 kHz. Pro popis principu funkce byly navrženy dvě teorie. První počítá s přítomností kapilárních vln, zatímco druhá pracuje s kavitační hypotézou. Jak uvádí Deepu [31], teorie kapilárních vln uvažuje tvorbu vln na rozhraní mezi kapalnou a plynnou fází, které se s časem stávají nestabilní a vedou k tvorbě malých kapek. Kavitační teorie poté uvažuje tvorbu bublinek páry (při poklesu tlaku na tlak sytých par), které vznikají na základě šíření ultrazvukové vlny od zdroje vibrací. Tyto bublinky následně implodují, což má za následek tvorbu hydraulického rázu, který je příčinou atomizace. Na přesný mechanismus vzniku ultrazvukové atomizace však dodnes není jednoznačný názor. Schéma procesu ultrazvukové atomizace je znázorněno na Obr. 2-17.



Obr. 2-17 Mechanismus formace kapek ultrazvukovou atomizací při různých výkonech vstupu - upraveno [70]

Princip atomizéru s vibrující mřížkou (membránou) ve své práci popisuje například Najlah [32]. Tato zařízení využívají oscilující děrovanou destičku a je možné je dále dělit na pasivní (Obr. 2-18a) a aktivní (Obr. 2-18b). Pasivní atomizéry využívají vibrujícího piezokrystalu, který je připevněn k vlnovodu, který přenáší vibrace na destičku s otvory (počet děr je v řádu tisíců a velikost v řádu jednotek mikrometrů). Aktivní zařízení poté pracuje tak, že vibrující element svým pohybem rovnou propouští skrze otvory kapalinu, čímž produkuje aerosol.

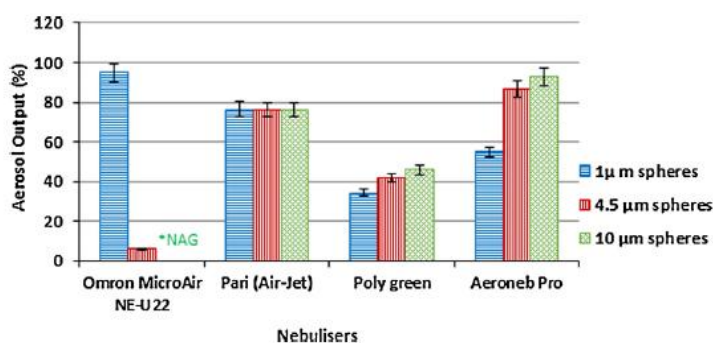


Obr. 2-18 Atomizéry s vibrující mřížkou - upraveno [33]

Vliv procesních parametrů na atomizaci

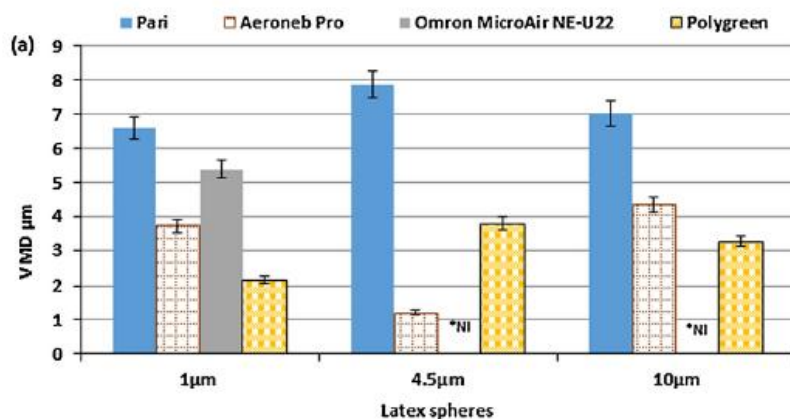
Ghazanfari [33] se zabýval vlivem vlastností kapaliny (viskozita, povrchové napětí a iontová koncentrace) na nebulizaci s použitím atomizérů s vibrující mřížkou (aktivní a pasivní). Zde se ukázalo, že velikost kapek má tendenci se zmenšovat s navýšením viskozity. S narůstající viskozitou se také prodlužoval čas nebulizace referenčního objemu kapaliny, čímž se snižoval objemový průtok aerosolu. V případě atomizování ethanolu se ukázalo, že při atomizaci s aktivním nebulizérem (Aeroneb Pro) byl střední objemový průměr kapek aerosolu $4,32 \pm 0,10 \mu\text{m}$, kdy bylo z referenčního objemu atomizováno $90,98 \pm 1,28 \%$ kapaliny. V případě pasivního nebulizéru (Omron MicroAir NE-U22) byl střední objemový průměr kapek $4,39 \pm 0,04 \mu\text{m}$ a z celkového objemu bylo na aerosol přeměněno $94,52 \pm 3,4 \%$ kapaliny. Data středních objemových průměrů byla získána na základě využití metody laserové difrakce.

Najlah [32] se zabýval tím, jak velikost částic v suspenzi ovlivní činnost různých atomizérů (vzdušný – Pari, ultrazvukový – Polygreen, aktivní s vibrující mřížkou – Aeroneb Pro a pasivní s vibrující mřížkou – Omron). Jako částice zde byly využity latexové kuličky o velikostech 1, 4.5 a 10 μm . Graf závislosti procentuálního množství vytvořeného aerosolu na velikosti dispergovaných částic pro různé atomizéry je znázorněn na Obr. 2-19.



Obr. 2-19 Závislost vytvořeného aerosolu na velikosti částic suspenze a typu atomizéru. [32]

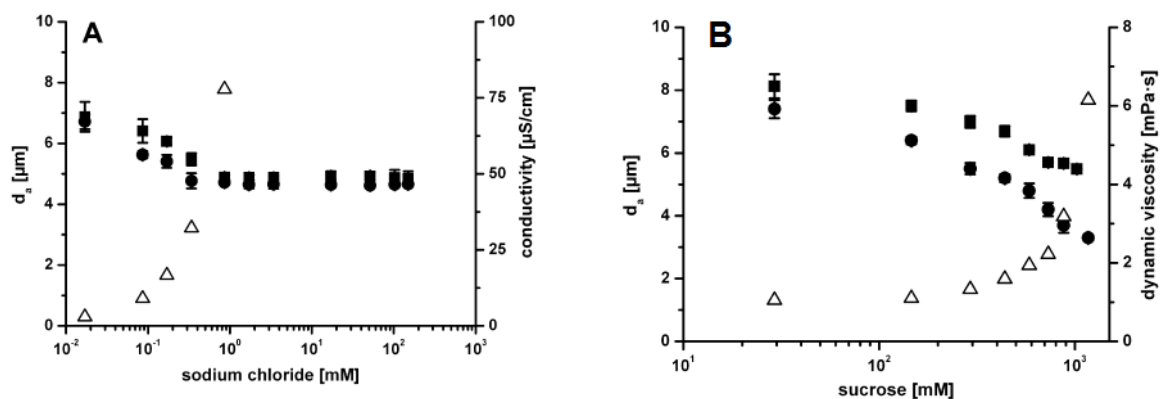
Z grafu na Obr. 2-19 je patrné, že nebulizér Omron MicroAir NE-U22 (pasivní atomizér s vibrující mřížkou) není v případě částic o velikosti 10 μm schopen produkovat aerosol. Naopak nebulizér AeronebPro (aktivní atomizér s vibrující mřížkou) vykazuje pro 10 μm částice výstup nejvyšší. Střední objemový průměr kapek aerosolu z jednotlivých atomizérů pro různé velikosti částic je poté uveden na Obr. 2-20.



Obr. 2-20 Střední objemový průměr aerosolových kapek v závislosti na velikostech částic suspenze a typu atomizéru - upraveno [32]

Práce Gomez [34] se zabývala tvorbou aerosolu (vzdušným proudovým atomizérem) ze suspenze vodného roztoku s nanočásticemi TiO_2 . Práce byla zaměřena na vliv proudu vzduchu, čistoty vody v suspenzi, koncentrace částic oxidu titaničitého a pH suspenze. Ukázalo se, že stabilita roztoku měla na aerosol zásadní vliv. V případě suspenze, která byla svým pH blízko izoelektrického bodu, byly v roztoku utvořeny agregáty, které měly za následek snížení koncentrace částic v aerosolu.

Beck-Broichsitter [35] ve své práci řešil vliv aditiv na velikost kapek vodného roztoku vytvořených aktivním nebulizérem s vibrující membránou (typ Aeroneb Pro a typ eFlow). Práce byla zaměřena na vliv vodivosti, povrchového napětí a dynamické viskozity roztoku. Z výsledků vyplývalo, že se zvyšující se vodivostí (přidáním chloridu sodného, octanu sodného nebo glycinu) docházelo k poklesu velikosti kapek pod hodnotu $5 \mu\text{m}$. Stejný trend nastal, když byla zvyšována dynamická viskozita kapaliny. Pokles velikosti kapek vlivem změny povrchového napětí autoři přisuzovali zvýšení vodivosti kapaliny, která díky přidání surfaktantu narůstala. Graf závislosti velikosti kapek na vodivosti a dynamické viskozitě je uveden na Obr. 2-21. Vyplněné čtverečky zde značí výsledky velikostí kapek z atomizéru Aeroneb Pro, vyplněná kolečka uvádějí velikosti částic získané zařízením eFlow, zatímco prázdné trojúhelníky symbolizují hodnoty vodivosti (Obr. 2-21A) nebo dynamické viskozity (Obr. 2-21B).



Obr. 2-21 Závislosti velikosti kapek na vodivosti a dynamické viskozitě kapaliny - upraveno [35]





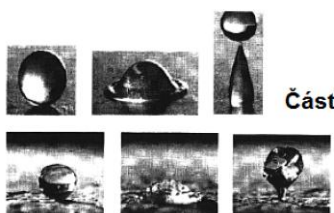
Kudo [36] zkoumal vliv frekvence na rozptyl velikostí částic aerosolu vytvořeného ultrazvukovým atomizérem. Jako atomizovaná kapalina zde byla použita čistá a kohoutková voda. Při zvýšení frekvence atomizéru se pro oba typy vody posouval vrchol distribuce částic k menším hodnotám průměru částic, zatímco se jejich koncentrace ve vytvořené mlze zvyšovala. Ukázalo se také, že pokud byl zvýšen vstupní výkon, při zachování velikosti oscilátoru, vrchol distribuce částic byl víceméně u stejné hodnoty, avšak koncentrace částic se zvýšila. Pokud byla změněna hustota výkonu tak, že byla změněna velikost ultrazvukové membrány, docházelo jak ke změně koncentrace, tak k posunu vrcholu distribuce částic.

2.3.3 Dynamika aerosolu

Aby bylo docíleno dobrého povlaku, je potřeba, aby kapky obsažené ve spreji dopadaly na zmatňovaný povrch v požadovaném režimu. Pro tuto práci je klíčové docílit režimu depozice (tzv. režim „*spread*“). O vhodnosti režimu depozice bylo pojednáno i v práci Rukosuyev [37].

V práci Rioboo [38] se zabývali výsledky dopadu kapky (o průměru 0,07 až 3,5 mm) na pevný povrch, který měl různou drsnost a smáčivost. Autoři zde také uvažovali různé kapaliny s různou viskozitou, povrchovým napětím a hustotou. Při dopadu kapky na pevný povrch můžou nastat případy uvedené v Tab. 2-4.

Tab. 2-4 Příklady způsobu dopadu kapky na pevný povrch - upraveno [38]

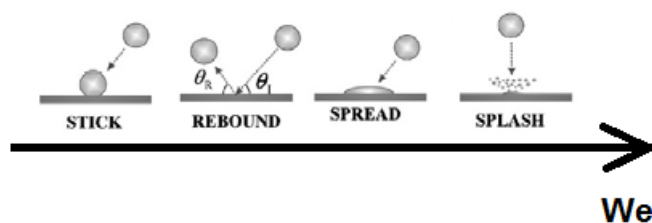
Označení režimu	Stručný popis	Příklad
Depozice (nános)	Kapka zůstává přichycena k povrchu, aniž by došlo k jejímu rozbití. Její tvar je deformovaný.	
Okamžitý rozstřík	Je typický pro dopad na drsné povrchy. Nastává ihned po dopadu na povrch na počátku fáze, kdy se kapka začíná rozlévat v radiálním směru.	
Rozstřík s korónou	Je typický při dopadu kapky na tenký tekutý film. Kapky jsou vytvořeny z okraje koróny vzdálené od pevného povrchu.	
Ustupující rozpad	Je případ spjatý se smáčivostí povrchu. Nastává, když se maximální poloměr rozlité kapky na povrchu začne zmenšovat a kapka se vrací ke svému původnímu stavu, kdy dochází k poklesu kontaktního úhlu. Důsledkem toho může být oddělení některých kapek na povrchu.	
Úplný nebo částečný odraz	Nastává, pokud je v procesu dopadu přítomné ustupující chování kapky z maximálního rozlitého poloměru. Rozdíl mezi úplným a částečným odrazem je na základě dynamického kontaktního úhlu ustupování. Pro nízké hodnoty je pozorován částečný odraz, zatímco pro vysoké hodnoty se objevuje úplné odskočení.	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-end;">  <div style="display: flex; gap: 10px;"> <div>Částečný</div> <div>Úplný</div> </div> </div>

Přehled faktorů, které ovlivňují jednotlivé režimy, je uveden v Tab. 2-5. Šipky nahoru zde ukazují podporu daného režimu při zvýšení některého z parametrů, zatímco šipky dolů značí potlačení daného chování. Písmeno V_0 značí dopadovou rychlost, D je velikost kapky, σ je povrchové napětí, μ je viskozita, Ra označuje průměrnou aritmetickou úchylku profilu, $R\omega$ je vlnitost povrchu a Θ_{rec} je ustupující kontaktní úhel.

Tab. 2-5 Vliv vybraných parametrů na dopad kapky na pevný povrch - upraveno [38]

Zvýšení parametru	Depozice	Okamžitý rozstřík	Rozstřík s korónou	Ustupující rozpad	Částečný odraz	Úplný odraz
V_0	↓	↑	↑	↑	↑	
D	↓	↑				
σ		↓	↓	↑	↑	↑
μ	↑	↓	↓	↓		
Ra	↓	↑	↓			
$R\omega$		↓				
Θ_{rec}				↑	↑	↑

Přehled režimů dopadu kapky na suchý povrch v závislosti na Weberově čísle je znázorněn na Obr. 2-22, který byl převzat z práce Lee [39]. „Stick“ v tomto případě značí ulpění, „rebound“ značí odraz, „spread“ značí depozici a „splash“ označuje rozstřík kapky.



Obr. 2-22 Závislost režimu dopadu kapky na Weberově čísle - upraveno [39]

Dopad spreje na pevný povrch poté řeší například práce Zhang [40]. Zde hovoří o tom, že interakce spreje s pevným povrchem je extrémně komplikovaný proces, který ovlivňuje mnoho faktorů. Jsou to rychlost, velikost, teplota, viskozita a povrchové napětí kapek, teplota povrchu a také jeho drsnost. Důležitým faktorem může být i tekutinný film na uvažovaném povrchu. Aby bylo možné alespoň rámcově popsat předpokládané chování kapek při jejich dopadu, existují predikční kriteria, která umožňují definovat, jaký režim dopadu lze u kapek předpokládat. Aby bylo možné režim dopadu predikovat, využívají se bezrozměrná čísla uvedená v Tab. 2-6.

Tab. 2-6 Přehled bezrozměrných čísel

Bezrozměrná čísla	
Weberovo číslo	$We = \frac{\rho \cdot D \cdot V_0^2}{\sigma}$
Reynoldsovo číslo	$Re = \frac{D \cdot V_0}{\nu}$ <i>obecný tvar</i> $Re = \frac{\rho \cdot D^n \cdot V_0^{(2-n)}}{k}$ <i>nenewtonská tekutina</i>
Laplaceho číslo	$La = \frac{Re^2}{We}$
Ohnesorgeho číslo	$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re}$
Kapilární číslo	$Ca = \frac{\mu \cdot V_0}{\sigma}$

Kde D je průměr kapky, V_0 je dopadová rychlost, ν je kinematická viskozita, ρ je hustota kapaliny, σ je povrchové napětí a μ je dynamická viskozita.

V práci Zhang [40] uvádějí kritérium definující hranici mezi depozicí a rozstříkem pro dopad jedné kapky na suchý povrch. Toto kritérium je:

$$K_{dry, splash} = 649 + 3.76R_{nd}^{-0.63} \quad (4)$$

kde R_{nd} je bezrozměrná drsnost povrchu, která je definována poměrem mezi průměrnou drsností povrchu (Ra) a průměrem dopadající kapky (D). Parametr K_{dry} je bezrozměrné číslo, které je obecně definováno:

$$K_{dry} = A \cdot Oh^a \cdot We^b \quad (5)$$

Kde A , a , b jsou empirické konstanty. V této studii využívali koeficient $A = 1$, $a = -0.4$, $b = 1$. Toto kritérium může být následně zapsáno:

$$We_{dry, splash} = Oh^{0.4} (649 + 3.76R_{nd}^{-0.63}) \quad (6)$$

V práci Zhang [40] uvádějí také kritérium pro vlhký povrch, kde hranice mezi režimy dopadu ulpění \rightarrow odraz ($We_{wet, stick}$) a odraz \rightarrow depozice ($We_{wet, rebound}$) jsou definovány těmito Weberovými čísly:

$$We_{wet, stick} = 5 \quad (7)$$

$$We_{wet, rebound} = 10 \quad (8)$$

Níže uvedená kritéria pro definici hranice mezi režimem depozice („*spread*“) a rozstříkem („*splash*“), která byla zmíněna v práci Zhang [40], poté uvažují i případnou tloušťku tekutiného filmu, který se může na pevném povrchu objevit.

$$450 \quad \text{pro } \delta \leq 0,1 \quad (9)$$

$$We_{wet,splash} = 1375,7 \cdot \delta + 340 \quad \text{pro } 0,1 < \delta < 1,0 \quad (10)$$

$$1043,8 + 232,6 \cdot \delta^{-1} - 1094,4 \cdot \delta^{-2} + 1576,4 \cdot \delta^{-3} \quad \text{pro } \delta > 1,0 \quad (11)$$

Kde δ označuje bezrozměrnou tloušťku tekutinného filmu, která je definována poměrem průměrné tloušťky filmu (h) a průměru dopadající kapky (D).

V práci Mundo [41] uvádějí další predikční model, který uvažuje, že hranice mezi depozicí a rozstříkem pro drsný i hladký povrch, může být ve vztahu s Reynoldsovým a Ohnesorgeho číslem. Silná korelace byla pozorována a dána rovnicí:

$$K = Oh \cdot Re^{1,25} \quad (12)$$

Pokud hodnota K dosáhne hodnoty 57,7, vede to k započítí módu rozstříku. Pokud je však hodnota K menší jak 57,7, nastává režim depozice.

Souhrnnou tabulku hranic režimů dopadu jediné kapky na pevný substrát uvádí například práce Panao [42] (viz Tab. 2-7).

Tab. 2-7 Souhrnná tabulka hranic režimů dopadu pro dopad jediné kapky [42]

Authors	Experimental conditions	Model
Mundo et al. (1995, 1998)	$60 < d_0 < 150 \text{ } \mu\text{m}$ $12 < U_0 < 18 \text{ m/s}$ $4^\circ < \alpha < 65^\circ$ (imping. angle) $1 < \mu < 2,9 (10^{-3} \text{ kg/m/s})$ $22 < \sigma < 72 \text{ mN/m}$ $70 < d_0 < 340 \text{ } \mu\text{m}$	$K = Oh \cdot Re^{1,25}$ $K = 57,7$ (deposition to splash)
Yarin and Weiss (1995)	$U_0 \leq 30 \text{ m/s}$ $R_a \approx 1 \text{ or } 16 \text{ } \mu\text{m}$ (average roughness) $h_l = \{\text{min: } 20, \text{ max: } 50\} \text{ } \mu\text{m}$ (liquid film thickness) $0 \leq \delta \leq 0,3$	Splashing at $\epsilon = \sigma v^{1/2} f^{1/2} (\rho U_0^4)^{-1} \ll 1$ When $\epsilon \leq 18^{-4}$ and f is the impact frequency
Cossali et al. (1997)	$0,0022 \leq Oh \leq 0,141$ $R_a = 0,14 \text{ } \mu\text{m}$	$K_L = (Oh^{-0,4} We)_L = 2,100 + 5,880 \delta^{1,44}$ Valid for $0,1 < \delta = h_l/D_0 < 1$ and $Oh > 7 \times 10^{-3}$
Bai et al. (2002)	Dry Adhesion(stick/spread) \rightarrow splash wetted Stick \rightarrow rebound Rebound \rightarrow spread Spread \rightarrow splash	$We_c \approx 2,630 \cdot La^{-0,183}$ $We_c \approx 2$ $We_c \approx 20$ $We_c \approx 1,320 \cdot La^{-0,183}$ for $\delta \leq 0,1$, $We_c = 450$
Wang et al. (2002) ^a	Spread to splash	for $0,1 < \delta \leq 1$, $We_c = 1,375,7\delta + 340$ for $\delta > 1$, $We_c = 1,043,8 + 232,6\delta^{-1} - 1,094,4\delta^{-2} + 1,576,4\delta^{-3}$

V souvislosti s dynamikou aerosolu se může ve spreji objevit i tzv. sekundární atomizace. Jak bylo uvedeno v práci Guildenbecher [43] proces sekundární atomizace je v podstatě rozbití primárně utvořené kapky na menší fragmenty vlivem okolního pole proudění. Aerodynamické síly v tomto případě od určité velikosti působí na primárně utvořenou kapku, kterou postupně deformují a mohou vést až k jejímu rozbití na menší částice. Interakce kapky s okolní fází je definovaná samotným prouděním, kdy jeho různá velikost vede k různým typům tohoto fenoménu. V Tab. 2-8 byly uvedeny hraniční hodnoty Weberových čísel pro newtonské kapky pro stanovení hranic jednotlivých režimů sekundární atomizace. Vyšší Weberovo číslo v tomto případě znamená větší náchylnost

k sekundární atomizaci. Sekundární atomizace pak také závisí i na Ohnesorgeho číslu, jehož vyšší hodnota by měla znamenat menší tendenci k fragmentaci kapky [43].

Tab. 2-8 Hraniční hodnoty Weberova čísla pro jednotlivé typy sekundární atomizace pro $Oh < 0,1$ [43]

Kapka tvořena newtonskou kapalinou s $Oh < 0,1$	
Mód	Hraniční hodnota Weberova čísla
„Vibrational“	$0 < We < \approx 11$
„Bag“	$\approx 11 < We < \approx 35$
„Multimode“	$\approx 35 < We < \approx 80$
„Sheet-thinning“	$\approx 80 < We < \approx 350$
„Catastrophic“	$We > \approx 350$

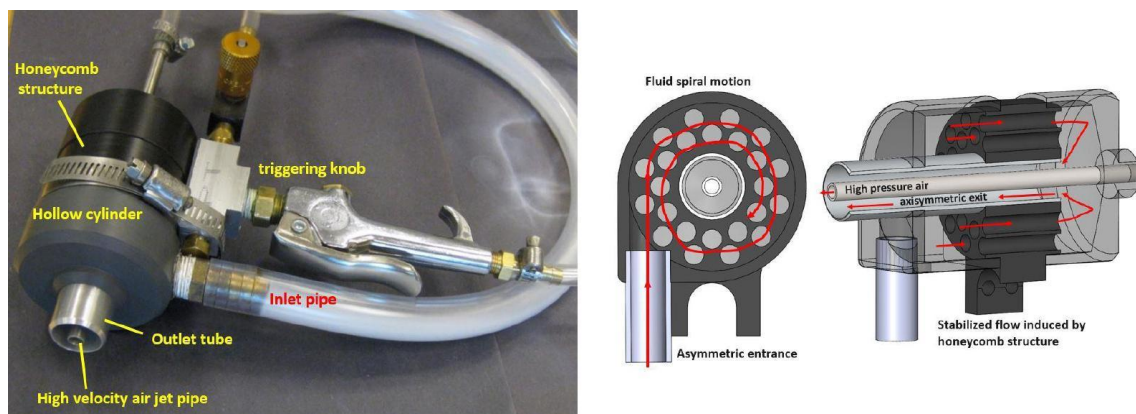
V práci Guildenbecher [43] byly uvedeny také predikční modely pro definici hraniční hodnoty Weberova čísla pro jednotlivé módy sekundární atomizace, pro případ, kdy je Ohnesorgeho číslo vyšší jak 0,1. V tomto případě je využito hodnot Weberových čísel uvedených v Tab. 2-8, které jsou dále přepočítány pomocí rovnic uvedených níže:

$$We_c = We_{Oh0,1} \cdot (1 + 1,077 \cdot Oh^{1,6}) \quad Oh < 10 \quad (13)$$

$$We_c = We_{Oh0,1} \cdot (1 + 1,5 \cdot Oh^{0,74}) \quad Oh < 4 \quad (14)$$

2.3.4 Geometrie nánosové pistole

Valinasab [44] ve své práci navrhuje konstrukci nástřikové pistole, která pro tvorbu aerosolu využívá kolizního nebulizéru. Fotografie a schéma tohoto zařízení je zobrazeno na Obr. 2-23.

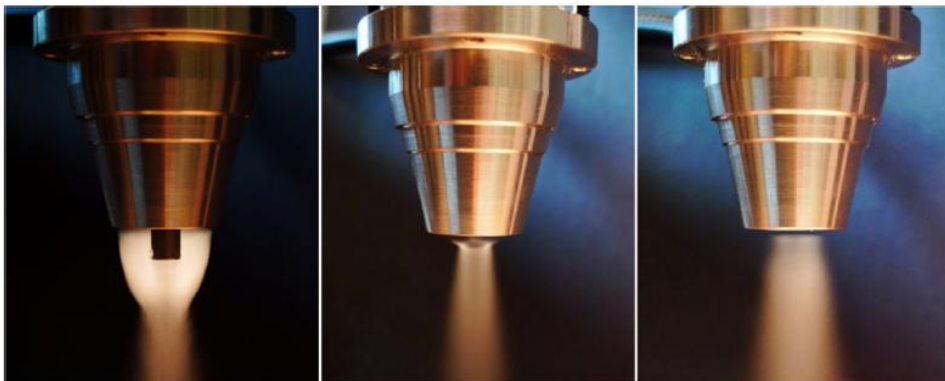


Obr. 2-23 Atomizační nánosová pistole s kolizním nebulizérem [44]

Vstup mlhy do nánosové pistole je umístěn excentricky, aby proudění atomizované směsi po vstupu do komory bylo spirálovité. Toto proudění by mělo způsobit odstředivý efekt, aby se kapky aerosolu v komoře roztřídily dle velikosti. Atomizované kapky jsou zároveň do této komory přiváděny s dostatečně malou rychlostí, aby bylo zabráněno kondenzaci. Další část komory, která připomíná včelí plástev, stabilizuje proudění a snižuje tak turbulentní proudy. Výstupní otvor je válcový, kde tryska stlačeného vzduchu i ústí atomizované mlhy jsou sousedé. Proud stlačeného vzduchu umožňuje potřebné zrychlení ústící směsi, aby bylo na zmatňovaném povrchu možné vytvořit výsledný nástřik.

Hruboš [1] ve své práci uvažuje podobnou konstrukci jako v práci Valinasab [44], s tím rozdílem, že pro vytvoření aerosolu je využit atomizér s vibrující membránou. Stejně jako v předchozí koncepci i tato pistole uvažuje excentricky umístěný vstup aerosolu do komory pistole a děrovanou desku pro usměrnění proudění. Výstupní otvory obou proudících médií jsou poté, stejně jako v případě práce Valinasab [44], sousedé a mají podobu válcového otvoru.

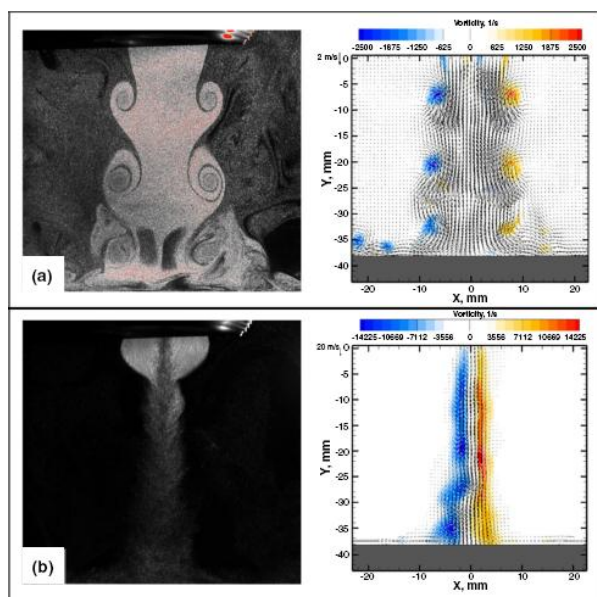
Umístěním koncovky trysky hnacího media vůči ústí atomizované směsi se zabýval Rukosuyev [37]. Na Obr. 2-24 je zachyceno, jak se mění vstup atomizované látky do proudu vzduchu v závislosti na umístění jeho koncovky trysky. Rukosuyev zmiňuje, že proudění má charakter stabilní vírové struktury, kde jsou atomizované kapky díky hnacímu mediu strhávány do rychle proudícího proudu.



Obr. 2-24 Výsledný proud při různých polohách koncovky trysky hnacího media.

Vlevo - tryska hnacího media vysazena z ústí. Uprostřed - koncovka trysky zároveň s ústím. Vpravo - koncovka trysky uvnitř ústí [37]

Rukosuyev se v této práci zabýval také studiem struktury proudění, ke kterému bylo využito vysokorychlostní kamery a techniky „*Particle Image Velocimetry (PIV)*“. Snímky získané touto technikou je možné vidět na Obr. 2-25. Obr. 2-25a znázorňuje proudění bez spuštění hnacího proudu plynu, kdy aerosol proudí centrální rychlostí $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Obr. 2-25b znázorňuje průběh spreje, když je spuštěn i centrální hnací proud. V tomto případě byla centrální rychlost $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Z výsledků je patrné, že hnací proud umožňuje řízené zaměření atomizovaných kapek do podstatně užší oblasti a zabraňuje tak tvorbě sekundárních vírů, jako je tomu v případě obrázku Obr. 2-25a.



Obr. 2-25 Studie proudění, a) Hnací proud plynu vypnutý, b) Hnací proud plynu spuštěn [37]

2.3.5 Měření dynamiky a vlastností aerosolu

Proudící sprej je poměrně komplexní problém, kdy aby bylo možné získat informace o jeho charakteristikách, je možné využít optické metody měření. Mezi takové technologie měření je možné zařadit například fázovou Dopplerovskou anemometrii (PDA - *Phase Doppler Anemometer*) nebo technologii *Particle Image Velocimetry* (PIV). Obě tyto techniky jsou bezdotykové a nevyužívají žádné měřicí sondy, které by mohly analyzované proudění zkreslit. PDA nabízí měření s dobrým rozlišením a nabízí informaci v jednotlivých bodech měření. Aby bylo možné prozkoumat konkrétní oblast, je potřeba měřicím zařízením zkoumaným pásmem posouvat. PDA nabízí možnost zjištění průměrné rychlosti částic a měření jejich průměru. Fázová Dopplerovská anemometrie je založena na principu laserové Dopplerovské anemometrie (LDA), která je postavena na měření rozptylu světla na částici, která se pohybuje v proudícím poli (PDA oproti LDA umožňuje měřit i velikosti částic). Jako zdroj monochromatického světla je využíván laser. Základní fyzikální princip, který za touto technologií stojí je Dopplerův jev. Využívá se frekvenčního posunu laserového světla, které je od pohybující se částice odraženo do přijímače anemometru [45].

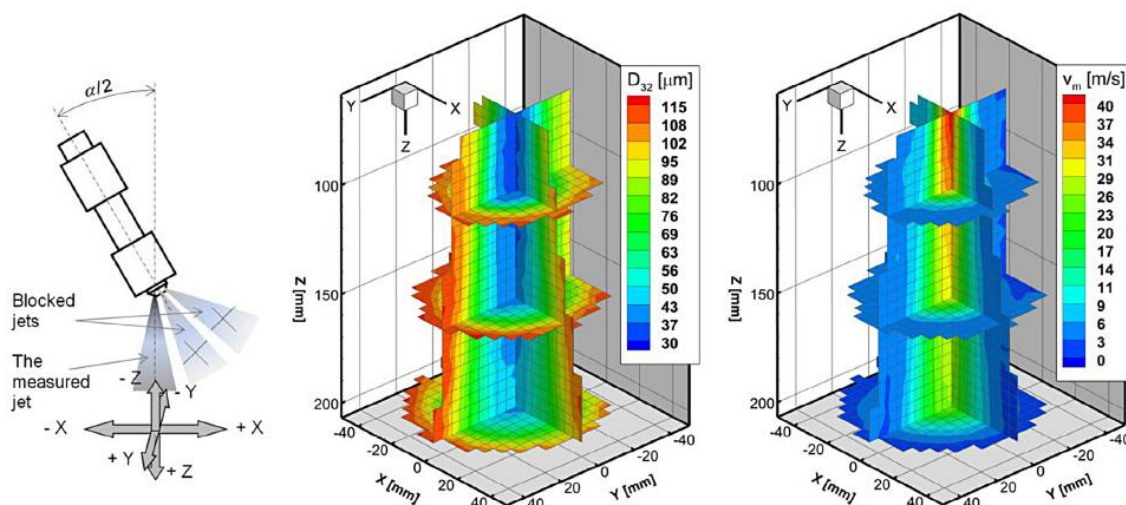
PIV je technika, která umožňuje zachytit pole rychlostních vektorů v oblasti proudění (viz Obr. 2-25). V tomto případě se využívá měření pohybu malých částeček, které jsou unášeny zkoumaným proudem. Měřené proudící pole je osvětleno laserem, který osvětlí částice. Obraz je následně zachycen fotoaparátem, který je umístěn v těsné blízkosti měření. Proces osvětlení a zachycení snímku je opakován, čímž je možné měřit rychlost jednotlivých částic [45].

Příkladem využití metody PDA je například práce Jedelský a Jícha [46], kteří se ve své práci zabývali vlastnostmi vytvořeného spreje a distribucí kapek u víceotvorového efervescentního atomizéru pro průmyslové hořáky. Pro charakteristiku vzniklého spreje (tj. pro zjištění 3D grafu středních průměrů a rychlostí kapek ve vzniklém spreji) využili právě fázové Dopplerovské anemometrie. Pro samotné měření velikosti a rychlosti kapek bylo využito komerčního PDA Dantec Dynamics A/S. Výsledky naměřených dat byly znázorněny na Obr. 2-26. V tomto případě byla měření provedena v několika rovinách, ze kterých vnikly uvedené prostorové grafy. Na Obr. 2-26 *vlevo* bylo znázorněno schéma měřeného objektu. Na Obr. 2-26 *uprostřed* byl znázorněn 3D graf, který uvádí distribuci velikosti částic v prostoru, kde D_{32} je Sauterův střední průměr kapek. Na Obr. 2-26 *vpravo* byla poté uvedena průměrná axiální rychlost v_m . Kdy:

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (15)$$

$$v_m = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (16)$$

kde D_i a v_i je naměřený průměr a axiální rychlost jednotlivých kapek.



Obr. 2-26 Příklad výsledků fázové Dopplerovské anemometrie. Vlevo schéma měřeného atomizačního zařízení. Uprostřed prostorový graf Sauterova středního průměru kapek. Vpravo prostorový graf střední rychlosti spreje. [46]

Možnosti PDA shrnují na webu *Energetické fórum*. Zde nabízí informace k Dopplerovskému anemometru Dantec Dynamics, který umožňuje měřit částice o velikosti 0,5 - 2000 μm s rychlostmi až 180 m/s. Typické použití tohoto zařízení je poté například pro měření kapalných aerosolů z nebulizérů, hydrodynamické studie ve volném prostředí i v průhledných modelech, měření pohybu bublin a jejich velikosti, sledování interakce spreje s okolím, studium dynamiky proudění tekutin a další. Výsledky z měření touto technologií mohou být například histogramy velikostí, rychlostí a časů detekce (průletu) částic, odhad koncentrací a hmotnostních toků nebo statistiky velikostí a rychlostí proudících částic [47].

2.3.6 Střední průměry kapek ve spreji

Při analýze spreje je možné velikosti kapek vyhodnocovat pomocí středních průměrů kapek. Pro tuto práci se jako nejpodstatnější jeví průměry D_{10} a D_{30} [29, 48, 49]:

Arithmetic Mean Diameter (AMD) – D_{10}

D_{10} je prostým aritmetickým průměrem průměrů kapek ve spreji. Tento průměr je vhodný i z hlediska vyhodnocování rychlosti odpařování.

$$D_{10} = \frac{\sum N_i \cdot D_i}{\sum N_i} \quad (17)$$

Volume Mean Diameter (VMD) – D_{30}

Tento průměr se hodí pro aplikace, kde je podstatná informace o objemu. Je to v podstatě průměr kapky, jejíž objem, pokud by byl vynásoben počtem kapek, je roven celkovému objemu vzorku.

$$D_{30} = \left(\frac{\sum N_i \cdot D_i^3}{\sum N_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Pro tuto práci bylo uvažováno použití 3D skeneru Atos III Triple Scan, který pro svoji činnost využívá strukturovaného světla promítaného na skenovaný objekt. Jak bylo v současném stavu poznání naznačeno, tyto metody 3D rekonstrukce objektů mají svá omezení v případě skenování povrchů, které mají zrcadlový, průhledný nebo průsvitný charakter. Stejně tak se jako problematické mohou jevit povrchy, které promítané světlo pohlcují. Pro zlepšení optických vlastností snímaného objektu se využívá aplikace zmatňujícího povlaku, který zlepšuje reflexi emitovaného světla do kamer skeneru. Pro samotnou aplikaci velmi tenkých nástríků je často využívána airbrushová pistole, která pracuje se suspenzí oxidu titaničitého. Ukázalo se však, že vhodnou alternativou pro aplikaci tenkých zmatňujících nástríků je nánosová pistole, která pro svoji činnost využívá atomizéru s vibrující membránou. Tato metoda je stejně jako airbrushová pistole schopná nanášet velmi tenké vrstvy v řádech stovek nanometrů, které jsou schopné povrch dostatečně zmatnit a zároveň jsou svojí tloušťkou pod hodnotou přesnosti skeneru Atos (presnost skeneru je okolo 5 μm). Výhoda atomizační metody se ukázala především v lepší stabilitě při nánosu pigmentu, jelikož suspenze v airbrushové pistoli zanáší štěrbinu ústí.

Atomizací vytvořený aerosol však ovlivňuje velké množství parametrů, které se mohou při špatném nastavení negativně promítnout na nanesené vrstvě. Pro další vývoj této metody je nutné tyto parametry ověřit a blíže prozkoumat jejich vliv na zmatňující nástrík. Problém lze očekávat ve špatném nastavení hnacího proudu vzduchu, v stabilitě a vlastnostech suspenze nebo dokonce v samotném procesu atomizace. Doposud se také nepodařilo přesně popsat proces ulpívání aerosolu na zmatňovaném povrchu. Předpoklad je takový, že pokud by se podařilo popsat a prověřit vliv změn jednotlivých vstupních parametrů, mělo by být možné řízeně dosáhnout ideální zmatňující vrstvy, která by byla jednotná, dostatečně tenká a zároveň by měla dostatečně dobré optické vlastnosti.

3.2 Analýza a zhodnocení poznatků z rešerše

I v dnešní době je pro běžné aktivní optické skenery problematické zachytit povrchy, které mají lesklý, průsvitný nebo průhledný charakter. Takové povrchy se negativně projeví v množství a charakteru odraženého světla do snímačů skeneru, což se odrazí v kvalitě zachyceného mračna. Díky tomu může být získáno mračno například s nedostatečným množstvím bodů, s chybovými body nebo s body se špatně dopočtenou souřadnicí hloubky (viz 2.1.2). Možnosti, jak zachytit objekty s problematickými povrchy jsou v zásadě dvě. První z nich uvažuje použití speciálních skenovacích technik, které vyžadují specifický hardware a výpočetní algoritmus, jak uvádí například Ihrke [6]. Druhá možnost, na které

je postavena i tato práce, je založena na aplikaci zmatňujícího povlaku na skenovaný povrch, který zlepší optické vlastnosti dané součásti a umožní tak její kvalitnější 3D rekonstrukci (viz kapitola 2.2). Mnoho výrobců i prodejců skenerů všeobecně doporučuje použití komerčních zmatňujících sprejů, které využívají nejrůznějších zmatňujících materiálů (typicky například křídové spreje). Aplikace povlaku komerčním sprejem má však nevýhodu v tloušťce nanesené vrstvy, která může dosahovat i desítek mikrometrů [15]. Takto silná vrstva se na skenované součásti projeví značnou změnou geometrie (viz Obr. 2-9), což může být v některých průmyslových aplikacích (např. kontrola kvality) nežádoucí. Snahou je nanést takovou vrstvu povlaku, která bude dostatečně tenká, ale zároveň dokáže povrch pro účely skenování dostatečně upravit. Každý skener pracuje s určitou přesností v dopočetní hloubky zachyceného bodu (řád jednotek až několika desítek mikrometrů). Snahou tedy je, aby nanesená tloušťka pigmentu byla právě pod touto hodnotou přesnosti. Jednou z možných nánosových metod může být například elektrostatický princip. U této metody je však vyžadováno elektricky vodivého objektu, což je nepraktické [11]. Druhou možností je airbrushová pistole. Tato metoda je schopna nanést dostatečně tenkou vrstvu, a také nevyžaduje žádné specifické vlastnosti povlakovaného objektu jako je například elektrická vodivost. Nevýhodu této metody však zmiňuje ve své práci Hruboš [1]. Pro nános zmatňující vrstvy se využívá suspenze s dispergovaným bílým pigmentem TiO_2 , který pistoli při provozu zanáší. Tím se mění její provozní parametry a účinnost nánosů. Možným řešením je nástríková pistole s membránovým atomizérem, která pro dopravu pigmentu na zmatňovaný povrch využívá proudu atomizované suspenze. Z hlediska nánosů matnicích povlaků na skenovaný objekt se tato atomizační metoda zdá být jako vhodná alternativa, a to především z důvodu možnosti stabilně nanést velmi tenké vrstvy, které mají na geometrii měřeného předmětu minimální vliv (viz Obr. 2-9), a to i při potřebě nanést více vrstev pro dobré zmatnění. V práci Hruboš [16] je zmíněno, že pro dostatečný zmatňující efekt bylo potřeba alespoň 80% překrytí povrchu. I přesto však nanesené vrstvy nepřesahovaly 600 nm.

Z hlediska volby bílého zmatňujícího pigmentu je prášek oxidu titaničitého ideální volba, a to díky jeho velkému indexu lomu, o čemž bylo pojednáváno v kapitole 2.2.1. V případě volby pigmentu je také podstatné zvolit správnou velikost primárních částic. Volba velikosti primárních částic by měla být provedena s ohledem na použitou vlnovou délku promítaného světla. Skener, který bude v této práci uvažován, pracuje s modrým světlem (vlnová délka okolo 405 - 500 nm). Vhodná velikost částic by tedy měla být okolo 150 nm, kdy by částice rutilového pigmentu měly mít největší míru relativního rozptylu světla [19]. Prášek TiO_2 je poté součástí suspenze, která v dalším kroku prochází přes atomizér. Pro suspenzi je potřeba vybrat také vhodnou nosnou kapalinu, ve které bude pigment dispergován. Dle požadavků je nutné používat takovou látku, která nebude podněcovat korozi (v případě zmatňování nekorozivizdorných objektů). Stejně tak je potřeba používat takovou nosnou kapalinu, která se po nanesení rychle odpaří. Z těchto dvou důvodů

nebudou uvažovány vodné roztoky. V případě výzkumů Paloušek a Hruboš [1, 15, 16] byl jako nosná kapalina použit ethanol, který nepodněcuje korozi a který se rychle odpařuje. U uvažované suspenze je však klíčové zajistit její stabilitu, tj. je třeba zajistit, aby v disperzi nedocházelo ke shlukování pevné fáze, ani k její sedimentaci. Pokud by stability směsi nebylo dosaženo, může docházet ke změně koncentrace napříč objemem roztoku nebo například ke snížení množství částic v aerosolu, jak o tom hovoří Gomez [34]. Hruboš [1] ve své diplomové práci zmiňuje, že pokud se v suspenzi nacházely shluky, vedlo to k mírnému zhoršení vlastností nanosené vrstvy povlaku (odchylka naskenovaných dat byla od referenční roviny větší).

V článku Farrokhi-rad [25] zmiňují, že se vzrůstající molekulární velikostí alkoholové nosné kapaliny (vzestupně metanol, ethanol, isopropylalkohol a butanol) stabilita vzrůstá. To potvrdily i experimenty, které byly v této práci provedeny. V práci Woo [24] se poté toto tvrzení také potvrdilo a ukázalo se, že při dispergaci částic TiO_2 o velikosti okolo 300 nm v alkoholové nosné kapalině bez přidání aditiv měl ethanol z hlediska stability horší vlastnosti. Mnohem lepší dlouhodobou stabilitu zde nabízel isopropylalkohol. Z tohoto důvodu se jako lepší volba zdá být oproti ethanolu právě isopropylalkohol.

Stabilitu lze však dosáhnout i tak, že se do suspenze přidá vhodné aditivum. Stabilizace může být sterická nebo elektrostatická, jak bylo naznačeno v kapitole 2.3.1. Elektrostatické stability může být v případě ethanolové suspenze docíleno přidáním kyseliny nebo zásady do nosné kapaliny, jak je uvedeno v práci Widegren a Bergström [21]. Tímto krokem je ovlivňován zeta potenciál suspenze. Pokud by byl zeta potenciál nulový, bude docházet k agregaci pevné fáze, což je pro tyto účely nežádoucí. Vytvoření stabilní suspenze přidáním zásady nebo kyseliny však není zcela vhodné pro běžné průmyslové využití. Je to z toho důvodu, že přidané látky mohou působit agresivně vůči svému okolí a mohou také u některých zmatňovaných materiálů podněcovat korozi. Z tohoto důvodu se jako lepší varianta jeví stabilizace sterická, kdy se do směsi přidá povrchově aktivní látka například na bázi vysoko-hmotnostních polymerů.

Na vlastnosti výsledné suspenze může mít vliv také velikost dispergovaných částic. Ta se může projevit například ve změně polohy izoelektrického bodu IEP, jak o tom hovoří Suttiponpanit [28]. Z výsledků zobrazených na Obr. 2-15 lze například usoudit, že v případě vodné suspenze s pH 6 budou částice o velikosti 6 nm agregovat, zatímco v případě suspenze s částicemi s velikostí okolo 104 nm by mělo být dosaženo stabilního systému. Stejně tak může velikost částic ovlivnit činnost atomizéru [32]. Aktivní atomizér s vibrující mřížkou (podobný tomu, který je použit v uvažované atomizační pistoli) dle článku [32] vykazoval téměř dvakrát vyšší výstup aerosolu pro suspenzi s částicemi o velikosti 10 μm v porovnání s atomizováním suspenze s částicemi o velikosti 1 μm . Naopak například atomizér pasivní s vibrující mřížkou pro větší částice (4,5 a 10 μm) produkoval výstupní množství aerosolu téměř nulové nebo nulové (viz Obr. 2-19). S klesajícím výkonem atomizéru lze poté očekávat klesající výkon nánosové pistole a tím i nános vrstvy s horšími optickými vlastnostmi.

Různá velikost částic se může projevit také například na reologických vlastnostech směsi [27]. Na základě výzkumů Ghazanfari [33] a Beck-Broichsitter [35] lze očekávat, že se reologické vlastnosti roztoku projeví na velikosti vytvořených kapek při samotné atomizaci. V obou těchto studiích autoři měnili viskozitu v rozsahu cca od 1 do 6 mPa·s. Při zvýšení viskozity se v obou případech velikost kapek snižovala v řádech jednotek mikrometrů (viz Obr. 2-21). Podobný trend poté nastával v práci Beck-Broichsitter [35], když se zvyšovala elektrická vodivost atomizovaného roztoku.

Důležitým faktorem pro nanesení dobré zmatňující vrstvy je poté dynamika aerosolu při dopadu na pevný povrch. Pro účely nánosu zmatňující vrstvy je snahou dosáhnout režimu depozice. Na tento režim by dle autorů Rioboo a kol. [38] měla mít negativní vliv zvyšující se dopadová rychlost, nárůst velikosti kapky a nárůst drsnosti povrchu. Větší viskozita kapky by poté měla naopak vést k podpoře tohoto režimu. Velikost kapek je v tomto případě primárně určena funkcí atomizéru (uvažovaný atomizér - aktivní s vibrující mřížkou), kdy z rešerše plyne, že i při změně viskozity (cca od 1 do 6 mPa·s) nedochází k drastické změně velikosti vyprodukovaných kapek. Při studiu výsledků Hruboš [1] se viskozita ethanolové suspenze s pigmenty TiO_2 s různou velikostí výrazně neměnila. Pro tři velikosti pigmentů (60, 340 a 350 nm) se dynamická viskozita měnila od zhruba 1,4 do 2,1 mPa·s. Z toho lze usoudit, že se jako nejpodstatnější vliv jeví dopadová rychlost kapek. Chování kapky po dopadu lze poté predikovat pomocí hraničních kritérií a bezrozměrných čísel (viz kapitola 2.3.3).

Důležité informace z hlediska proudění aerosolu a případně i z hlediska interakce spreje s pevným substrátem lze poté získat s pomocí optických metod určených pro analýzu proudění. Mezi ty lze zařadit například fázovou Dopplerovskou anemometrii nebo metodu *Particle Image Velocimetry* (viz 2.3.5). Konkrétně pak metoda Dopplerovské anemometrie má možnost poskytnout informace o rozložení velikosti a rychlosti kapek napříč sledovaným proudem aerosolu, což se zdá být pro samotnou práci studia možností zmatňování povrchu velmi podstatné. Na charakter proudění a na výslednou vrstvu povlaku by poté mohla mít vliv i geometrie výstupního otvoru nebo umístění trysky hnacího proudu vzduchu v atomizační pistoli, jak ve své práci naznačuje Rukosuyev [37]. Dosavadní práce, které se zabývají atomizačními pistolemi pro zmatňování povrchu při 3D skenování, však uvažují vždy válcový výstupní otvor, a to jak v případě práce Hruboš [1], tak v případě Valinasab [44]. V případě práce Hruboš [1] pak bylo také počítáno s nástřiky pouze s jednou úst'ovou vzdáleností, která činila 100 mm.

3.3 Podstata a cíle diplomové práce

Podstatou diplomové práce je studium možností zmatňování povrchu pro účely 3D skenování se skenery, které využívají principu strukturovaného světla. Výzkum je založený na využití nánosové pistole, která pro svoji činnost využívá atomizéru s vibrující mřížkou. Práce by měla zodpovědět, jak se rychlost spreje, tvar ústí, úst'ová vzdálenost a typ použité suspenze s titanovou bělobou projeví ve výsledném zmatňujícím povlaku. Otázky, které práce zodpoví, jsou například:

- Jaký vliv bude mít predikovaný režim dopadu kapek suspenze na výsledný zmatňující nástrík? Předpokladem je, že režim depozice by měl vést k nejlepším výsledkům.
- Jak se na výsledném nástríku projeví tvar ústí pistole a úst'ová vzdálenost? Předpokladem je, že kvalitní nános by měl vzniknout do 100 mm od ústí pistole.
- Jak se projeví různé suspenze na výsledném nástríku? Předpokladem je, že nejlepší nástrík by měla vytvořit suspenze, která bude stabilní.

Hlavním cílem práce bude dosažení zmatňující vrstvy, která bude svojí tloušťkou výrazně pod hodnotou přesnosti používaného skeneru (řádově v desetinách mikrometru), která bude rovnoměrná a která bude mít dostatečnou zmatňující schopnost pro následné skenování. Hlavní přínos této práce bude možnost 3D rekonstrukce objektů bez ovlivnění její přesnosti nástríkem a popsání a prověření jednotlivých vstupních parametrů, které se přímo podílí na tvorbě nánosu, tj. porozumění vzniku nástríku na substrátu. Dalším podstatným přínosem bude také zjištění rozložení rychlostí a velikostí kapek ve vzniklém spreji. Stejně tak bude přínosem i samotné ověření použitelnosti této metody pro běžné průmyslové využití.

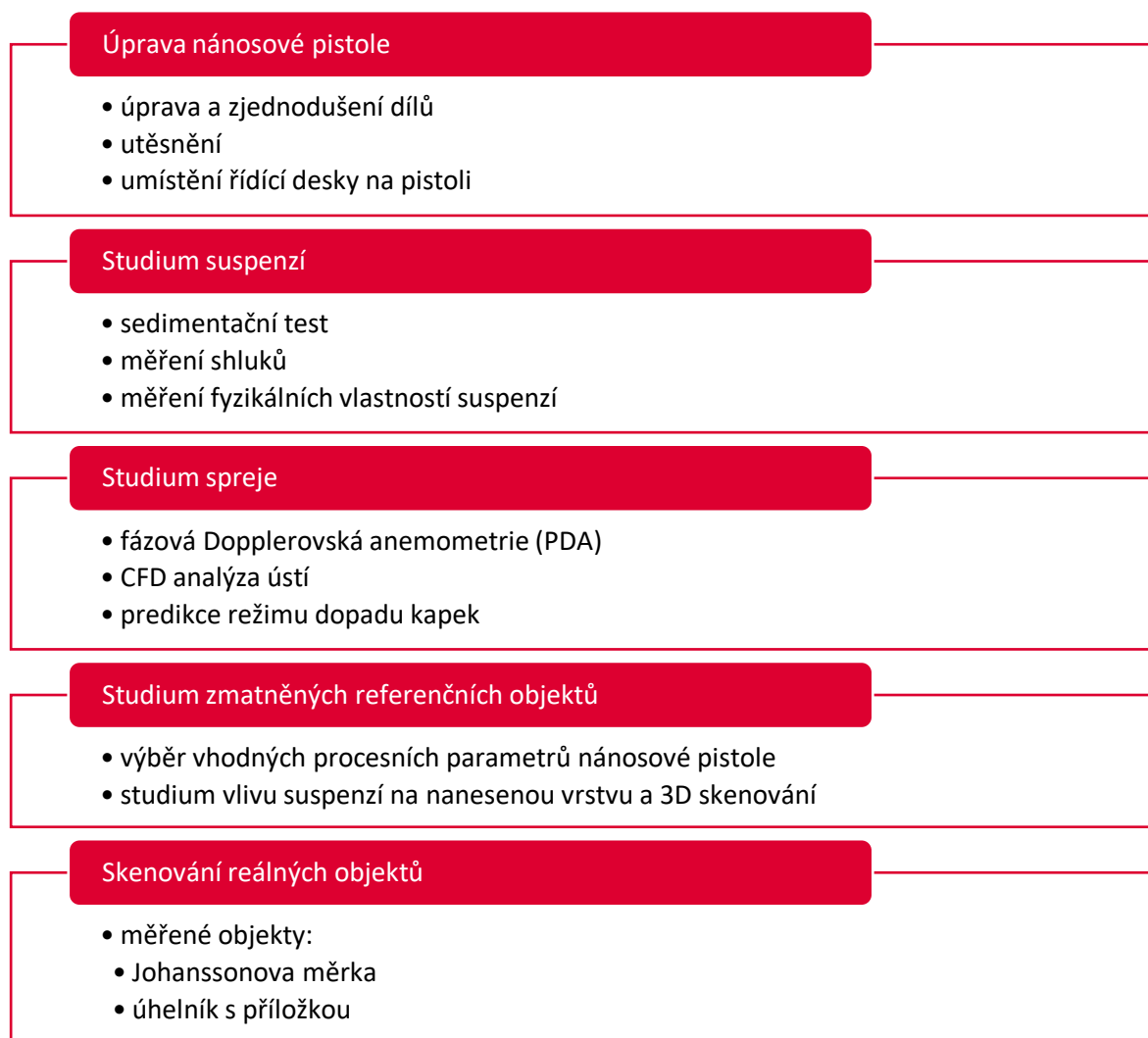
Dílčí cíle práce lze shrnout níže uvedenými body:

- Analýza použitých suspenzí zahrnující měření fyzikálních vlastností a studium stability
- Analýza spreje uvažující měření velikosti a rychlosti kapek ve spreji a predikce jejich režimu dopadu na pevný substrát
- Studie nánosů na referenčních objektech, která ověří vliv nastavení nánosové pistole a vliv různých suspenzí
- Zmatnění a 3D skenování reálných součástí, které ověří použitelnost této metody pro běžné průmyslové aplikace

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Postup řešení

Řešení této práce bylo rozděleno do několika hlavních oblastí, které jsou schematicky znázorněny na Obr. 4-1. Jednotlivé úkoly byly úprava nánosové pistole, studium suspenzí, studium spreje, studium zmatněných referenčních objektů a skenování reálných zmatněných objektů.

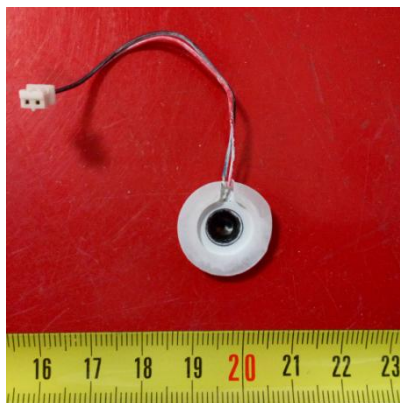


Obr. 4-1 Dílčí úkoly diplomové práce

4.2 Nástřiková sestava

4.2.1 Nánosová atomizační pistole

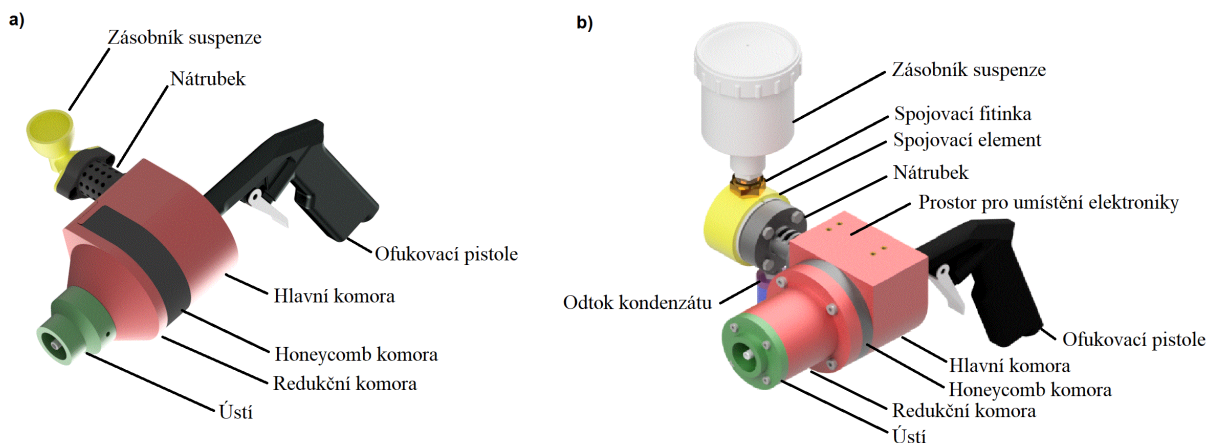
V této práci byla používána nánosové pistole, která byla navržena v rámci diplomové práce Hruboš [1]. Toto nánosové zařízení pracuje s membránovým atomizérem ICStation [50] (viz Obr. 4-2), který pro svoji činnost využívá perforované vibrující mřížky s otvory o velikosti cca 7-9 μm . Zařízení musí být napájeno napětím o velikosti 3,7-12 V, což následně umožní kmitání mřížky s frekvencí 113 kHz [1]. Oproti ultrazvukovému atomizéru se jedná o zařízení, které pracuje s nápořem kapaliny, tj. k zadní straně membrány musí být stále přiváděna kapalina. Pro samotný nános vytvořeného aerosolu se využívá tlakového vzduchu. Původní podoba pistole byla v rámci této práce přepracována za účelem zjednodušení jednotlivých komponentů, odstranění netěsností a umístění řídicí jednotky na tělo zařízení. Úpravám nástřikové pistole se věnuje kapitola 4.2.2.



Obr. 4-2 Vibrující membránový atomizér

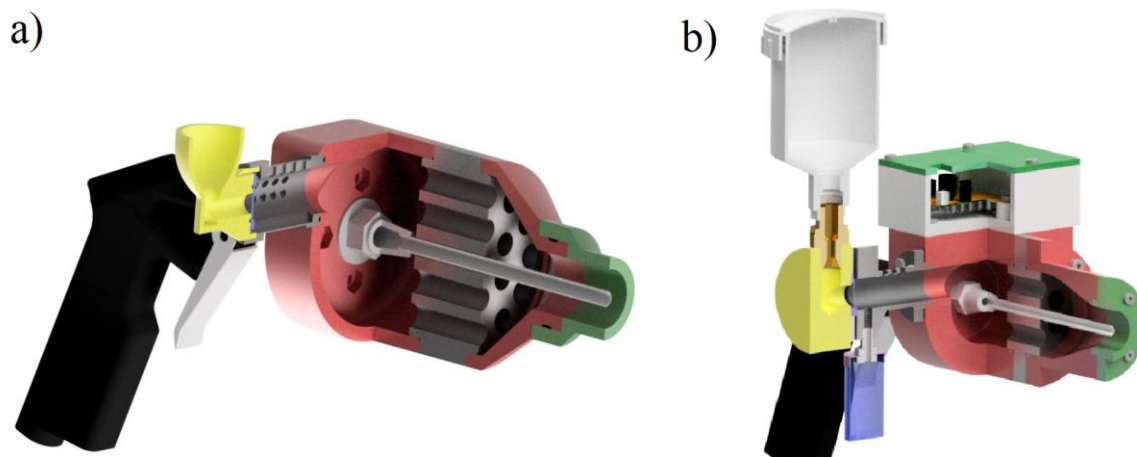
4.2.2 Úprava nánosové pistole

Při úpravě stávající pistole bylo snahou zjednodušit tvarovou složitost některých dílů. Při návrhu nové pistole bylo vycházeno z rozměrů a geometrie původní pistole. Byl kladen především důraz na celkové utěsnění spojů, úpravu dutiny kde proudí aerosol a umístění řídicí elektroniky přímo na tělo pistole. Problematické se ukázalo především spojení atomizéru mezi zásobníkem suspenze a nátrubkem. O úpravě tohoto konstrukčního uzlu pojednává kapitola *Připojení atomizéru*. Porovnání původní podoby pistole s novým designem je uvedeno na Obr. 4-3.



Obr. 4-3 a) Původní podoba pistole, b) Nová podoba pistole

Vnitřní geometrie pistole zůstala téměř nezměněna. Stejně jako u původní pistole je vstup atomizované suspenze přiveden do hlavní komory excentricky, čímž by mělo být docíleno odstředivého efektu, který by měl eliminovat případné větší kapky aerosolu. Za hlavní komorou je umístěna tzv. honeycomb komora, která má proudící mlhu usměrňovat z původního vírového pohybu po přívodu do hlavní komory z nátrubku. Zásadní změnu prodělala především redukční komora, která má nyní pozvolnější náběh k ústí pistole (viz Obr. 4-4). Tato změna byla provedena za účelem snížit ostré tvarové přechody, které by mohly přispívat k méně efektivnímu proudění v těle zařízení. Změna tohoto náběhu byla podložena úvahou, že pozvolná změna geometrie povede k nižším místním ztrátám energie proudící mlhy v těle pistole. Na základě této změny prodělala změnu i komora označená jako honeycomb. Průměr dutiny pistole se mírně zmenšil, na základě čehož v honeycomb komoře ubyla jedna řada otvorů. Aby však byl zajištěn dostatečný průtok aerosolu tímto elementem, byly otvory v této komponentě oproti původní verzi zvětšeny. Zásadní změnu prodělaly veškeré spoje mezi jednotlivými díly pistole. V původní verzi některé šroubové spoje zasahovaly do komory nánosové pistole. Nová verze tento nedostatek řeší, kdy šroubové díry byly provedeny jako slepé otvory. Jedinou nevýhodou takto řešených spojů je potřeba dostatečné tloušťky stěny, díky čemuž nová pistole působí robustněji. Tento krok byl proveden za účelem zlepšení efektivity proudění mlhy v dutině. Nově byl přidán také komerční zásobník suspenze s víčkem, který umožňuje práci s větším množstvím pracovní suspenze a snadnější údržbu. Řez původní a novou pistolí je možné vidět na Obr. 4-4.

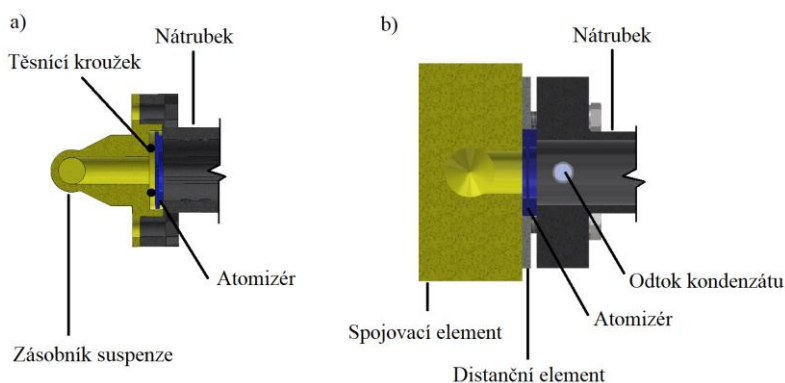


Obr. 4-4 a) Řez původní pistolí, b) Řez novou pistolí

Hlavní komora má nyní na horní rovinné ploše čtveřici děr pro připevnění krabičky s elektronikou. Ta obsahuje i slot pro 9V baterii, kterou je možné připojit k řídicí jednotce a odstranit tak potřebu používat síťový napájecí kabel.

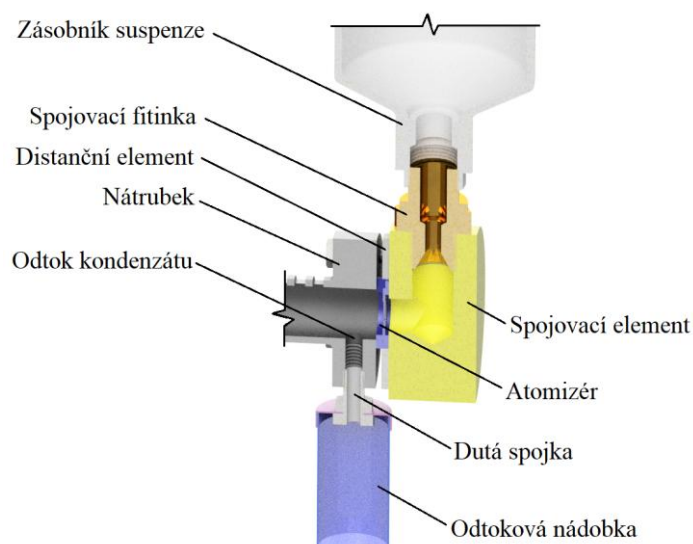
Připojení atomizéru

Připojení atomizéru bylo upraveno za účelem jeho lepšího utěsnění mezi nátrubkem a zásobníkem suspenze. Při bližší analýze tohoto konstrukčního uzlu se ukázalo, že pro zatěsnění je klíčové dostatečné sevření těsnění, kterým je atomizér obklopen. Atomizér nejlépe těsnil v případě, kdy byl čelně stlačen mezi dvěma protikusy. Na základě této analýzy byla zvolena koncepce uchycení atomizéru mezi dvě rovinné plochy (viz Obr. 4-5b). Pro zajištění rovnoměrného stlačení těsnění atomizéru, bylo využito přírubového spoje. Aby bylo zabráněno poškození atomizéru vlivem přílišného dotažení přírubových šroubů, byl navíc mezi nátrubek a spojovací element vložen tzv. distanční element, který definuje vhodné dotažení obou součástí k sobě. Distanční element je poté vybaven také drážkou pro možnost vyvedení kabeláže atomizéru.



Obr. 4-5 a) Původní uchycení atomizéru, b) Nové uchycení atomizéru

Při dlouhodobém provozu nánosové pistole se však ukázalo, že se za atomizérem hromadil kondenzát, který v určitém okamžiku začal působit proti atomizaci, což v extrémním případě vedlo až k jejímu chvilkovému přerušení. Z tohoto důvodu bylo potřeba nahromaděnou tekutinu odvádět mimo nátrubek. Odstranění této nahromaděné tekutiny bylo nutné i z toho důvodu, aby nedocházelo k jejímu vylévání přes ústí pistole. Za tímto účelem byla původní podoba nátrubku mírně modifikována. Příruba byla těsně za atomizérem navrtána tak, aby vytvořený kondenzát unikal mimo útroby nánosové pistole. Aby nedocházelo ke znečištění okolí samotnou zmatňující suspenzí, bylo navrženo umístění zásobní nádoby, kam přebytečná tekutina mohla odkapávat (viz Obr. 4-6). Upevnění této odtokové nádoby bylo realizováno pomocí duté spojky, která byla na jedné straně zašroubována do odtoku kondenzátu a na straně druhé procházela skrze otvor ve víčku nádoby. Dutá spojka měla v tomto případě podobu navrtnaného dřívku šroubu. Pro spojení spojky s víčkem bylo využito dvojice matek a jedna kontra matice, která zabraňovala povolování sestavy. Jako odtoková nádoba byla v tomto případě zvolena komerční dvojdílná nádoba se šroubovatelným víčkem.



Obr. 4-6 Uchycení atomizéru s upraveným nátrubkem s odvodem kondenzátu

Výroba nánosové pistole

Při výrobě pistole bylo zvažováno použití hliníkové slitiny jako konstrukčního materiálu. Zde se však jako nevýhoda ukázala hmotnost. Snahou při návrhu pistole bylo dosažení nízké hmotnosti kvůli komfortu při ručních nánosech. Jako druhý konstrukční materiál byl uvažován plast. Jelikož se jedná o prototyp, byla upřednostněna aditivní technologie výroby, která má výhodu ve své dostupnosti a nízké ceně. Při návrhu materiálu však muselo být uvažováno i s jejich chemickou odolností, jelikož nánosy budou prováděny se suspenzemi na bázi ethanolu a isopropylalkoholu. Původně byla uvažována technologie SLA (stereolitografie), která používá pro stavbu dílů fotopolymery (tzv. resiny). SLA byla zvažována především kvůli dobré kvalitě povrchu vytisknutých dílů. Bylo uvažováno

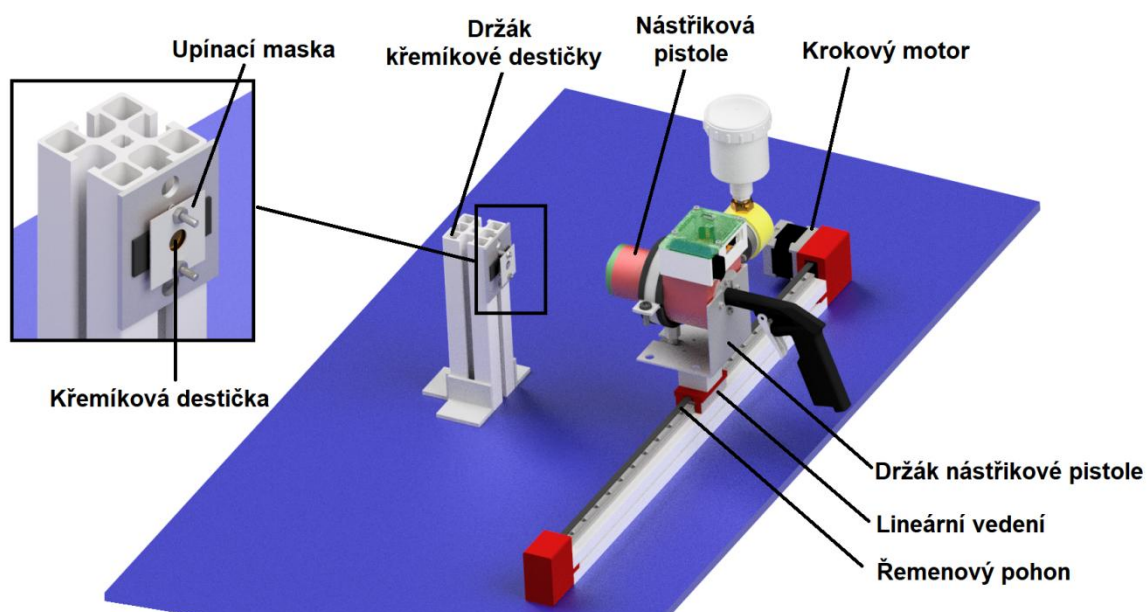
použít buď Clear nebo Black resin. Na základě komunikace s distributorem však nebyly SLA resiny pro stavbu pistole doporučeny, a to kvůli jejich nižší chemické odolnosti. Na základě toho byla zvolena technologie výroby FDM (Fused Deposition Modeling). Jako konstrukční materiál byl zvolen plast ABS, který by měl být vůči alkoholům dlouhodobě odolný. Ve spojení s technologií tisku FDM však vyvstávají dva zásadní problémy. První z nich je porozita a druhým je kvalita povrchu (spjata s napojením jednotlivých vrstev tisku). Porozita se ukázala jako problém pouze u zásobníku suspenze, jelikož byl tento díl kontinuálně vystaven tekutině. V tomto případě docházelo po nalití suspenze do nádoby k prokapávání přes stěnu. Tento nedostatek byl odstraněn spojovacím elementem vyrobeným z polyamidu a komerční zásobní nádobkou. Kvalita povrchu byla důležitá především v dutině nánosové pistole. Kaskádovitý povrch, který je pro FDM výtisky typický, byl v dutině vyhlazen acetonovými parami. Veškeré díly byly vytisknuty bez závitů. Tiskem byly pouze připraveny válcové otvory, do kterých byly umístěny mosazné závitové vložky. Ty umožnily sešroubování jednotlivých dílů k sobě. Hlavní komora, osazená závitovými vložkami, je zobrazena na Obr. 4-7. Použité těsnící prvky byly poté vybrány s ohledem na chemickou odolnost (zvolený materiál - EPDM).



Obr. 4-7 Hlavní komora s vloženými závitovými vložkami

4.2.3 Automatizované nástřikové zařízení

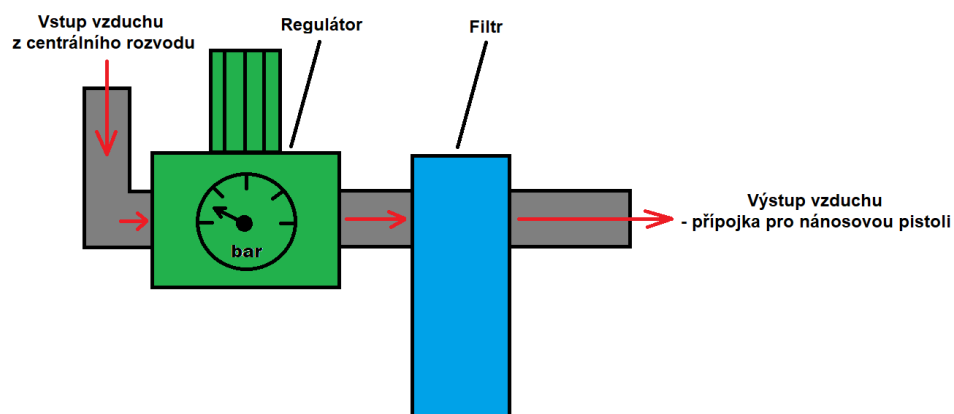
Aby byly při posuvu pistole vůči zmatňovanému substrátu zajištěny vždy stejné nánosové podmínky, bylo použito automatizované pojezdové zařízení (viz Obr. 4-8). Nástřiková pistole byla umístěna na pohyblivém vozíku, který se v rámci lineárního vedení pohyboval přesně definovanou rychlostí. Pohyb obstarával krokový motor řízený mikrokontrolerem Arduino.



Obr. 4-8 Automatizované nástřikové zařízení

4.2.4 Zdroj tlakového vzduchu

Ofukovací pistole, která je součástí nánosové pistole, byla připojena na centrální rozvod stlačeného vzduchu. Součástí přívodu stlačeného vzduchu byla filtrační vložka s aktivním uhlím s možností separace částic nad $0,01 \mu\text{m}$ (FVM $0,01 \mu\text{m}$ 1/2" - 1 600 [51]). Nastavení potřebného tlaku bylo zajištěno regulátorem s manometrem. Schéma řetězce pro úpravu stlačeného vzduchu před vstupem do nánosové pistole je uvedeno na Obr. 4-9.



Obr. 4-9 Řetězec pro úpravu stlačeného vzduchu

4.3 Studium suspenzí

4.3.1 Pigment

Jako pigment byla použita rutilová forma oxidu titaničitého kvůli jeho vysokému indexu lomu. Pro ověření vlivu velikosti částic TiO_2 byly zvoleny tři prášky s různou velikostí primárních zrn, kdy byl zkoumán jejich vliv na stabilitu směsi, vytvořený nástřík a schopnost zmatnit povrch. Specifikace použitých pigmentů jsou uvedeny v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Použité titanové běloby

Výrobce	Označení	Struktura	Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Průměrná velikost částic (nm)	Zdroj informací
Kronos	2066	Rutil	4 100	340	[52, 53]
Tronox	CR-826	Rutil	4 000	200	[54]
Precheza	Pretiox UVS30	Rutil	3 900	40	[55]

4.3.2 Nosné kapaliny

Jako primárně používaná nosná kapalina byl uvažován lihový (ethanolový) přípravek AG Likal, který se pro tyto účely na Ústavu konstruování běžně používá. Na experimenty s touto nosnou kapalinou byl tedy kladen největší důraz. Jeden z experimentů však byl zaměřen i na použití isopropylalkoholu (zkráceně IPA) jako možné substitute. Na základě rešerše se ukázalo, že v případě suspenze isopropylalkoholu a TiO_2 bylo možné bez přidání aditiv dosáhnout dlouhodobě stabilnějších směsí než v případě ethanolu. Z tohoto důvodu byl proveden i samostatný experiment, kdy bylo ověřováno, zdali by mohl být isopropylalkohol uvažován jako možná náhrada ethanolu. Specifikace použitých nosných kapalin jsou uvedeny v Tab. 4-2. Zveřejněné údaje jsou stanoveny výrobcem daných látek (viz sloupec „Zdroj informací“).

Tab. 4-2 Použité nosné kapaliny

Nosná kapalina	AG Likal	Isopropylalkohol
Výrobce	Agrimex, spol. s.r.o.	Nanobala s.r.o.
Specifikace látky	Ethanol > 90 %	Isopropylalkohol min. 99,9 %
	Ethandiol 1,2 < 1,3 %	
	2-butanon < 0,3 %	
	Bitrex > 0,001 %	
Zdroj informací	[56]	[57]

4.3.3 Stabilizační aditiva

Pro stabilizaci suspenzí TiO_2 a ethanolového prostředku AG Likal bylo uvažováno použití komerčně dostupného dispergačního prostředku. Původně uvažovaná elektrostatická stabilizace (bylo uvažováno přidání kyseliny nebo zásady do směsi) se po konzultaci s odborníkem ukázala jako nevhodná varianta. Bylo to z důvodu agresivity přidávaných látek vůči okolí, ale také z důvodu možnosti podněcování koroze při nánosu povlaku na reálný objekt. Jako stabilizační prostředek byl uvažován Disperbyk-2055 a Disperbyk-2155 od společnosti Byk. Tento stabilizační prostředek byl zvolen na základě doporučení od pracovníka technického oddělení pro speciální povlaky ze společnosti Byk. Obě aditiva umožňují sterickou stabilizaci systému, k čemuž využívají svou kopolymerní kompozici. Specifikace těchto aditiv jsou uvedeny v Tab. 4-3.

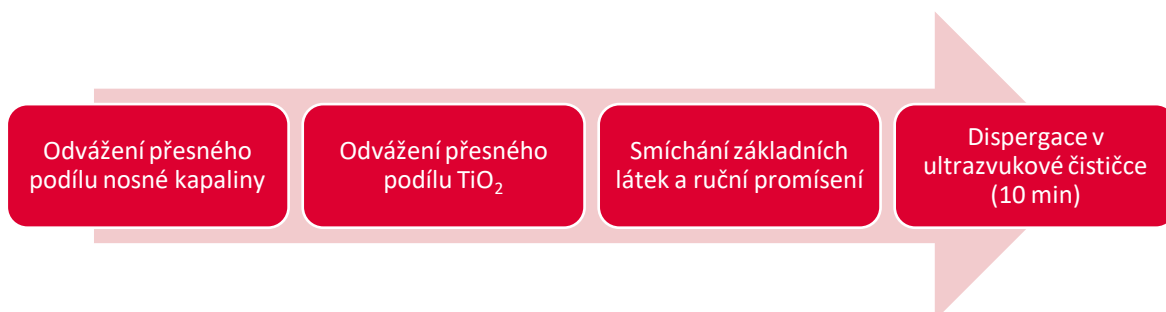
Tab. 4-3 Použitá stabilizační aditiva

Stabilizační aditivum	Disperbyk 2055 (zkráceně D2055)	Disperbyk 2155 (zkráceně D2155)
Výrobce	Byk	Byk
Kompozice	Kopolymer	Blokový kopolymer
Hodnota aminu	40 mg KOH/g	48 mg KOH/g
Hustota (při 20°C) ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 100	1 060
Doporučené množství pro směs s TiO_2 (%)	2-3	1-3
Zdroj informací	[58]	[59]

4.3.4 Příprava suspenzí

Pro přípravu suspenzí bylo využito váhy s přesností na alespoň jedno desetinné místo gramu a ultrazvukové čističky Ultrasonic Cleaner PS-20A s výkonem ultrazvuku 120 W a frekvencí 40 kHz. Příprava suspenzí vždy probíhala podle kroků uvedených níže.

Suspenze bez Disperbyku



Suspenze s Disperbykem



V Tab. 4-4 je uveden přehled suspenzí a nosných kapalin, které byly v průběhu práce používány. Zkratky ve sloupci *Měření/Experiment* označují, pro které experimenty a testy byly konkrétní suspenze využity. *H* – měření hustoty, *PN* – měření povrchového napětí, *DV* – měření dynamické viskozity, *DLS* – měření shluků metodou dynamického rozptylu světla, *ST* – sedimentační test, *PDA* – měření na fázovém dopplerovském anemometru, *SVPP* – studium vlivu procesních parametrů nánosové pistole, *SVS* – studium vlivu suspenzí.

V případě přípravy suspenzí s Disperbykem, součet všech složek dával 100 %. Tj. Pokud byla do směsi přidána například 3 % tohoto aditiva, *AG Likal* + *TiO₂* tvořily 97 % dané směsi. Je také potřeba zmínit, že stav suspenzí je závislý na čase. Vlivem těkavosti nosných kapalin je například hmotnostní poměr časově závislý. Stejně tak bylo potřeba počítat se sedimentací. Veškerá měření fyzikálních vlastností směsí tak byla provedena ihned po přípravě jednotlivých vzorků, aby byl vliv času co nejvíce potlačen. Postupy měření vlastností suspenzí byly uvedeny v následujících podkapitolách.

Tab. 4-4 Používané suspenze a nosné kapaliny

Suspenze	Měření/Experiment
AG Likal	H, PN, DV, PDA
IPA	H, PN, DV, PDA
Kronos 2066 : AG Likal (1:4)	H, PN, DV, ST, PDA, SVPP, SVS
Kronos 2066 : AG Likal (1:10)	H, PN, DV, SVS
Kronos 2066 : AG Likal (1:100)	H, PN, DV, DLS, PDA
Kronos 2066 : AG Likal (1:4) + 3 % D2055	ST
Kronos 2066 : AG Likal (1:100) + 3 % D2055	DLS
Kronos 2066 : AG Likal (1:4) + 3 % D2155	ST
Kronos 2066 : AG Likal (1:100) + 3 % D2155	DLS
Kronos 2066 : IPA (1:4)	H, PN, DV, ST, SVS
Kronos 2066 : IPA (1:100)	DLS
Tronox CR-826 : AG Likal (1:4)	ST
Tronox CR-826 : AG Likal (1:100)	DLS
Tronox CR-826 : AG Likal (1:4) + 2 % D2055	H, PN, DV, SVS
Tronox CR-826 : AG Likal (1:4) + 3 % D2055	ST
Tronox CR-826 : AG Likal (1:10) + 2 % D2055	H, PN, DV, SVS
Tronox CR-826 : AG Likal (1:100) + 2 % D2055	DLS
Tronox CR-826 : AG Likal (1:100) + 3 % D2055	DLS
Tronox CR-826 : AG Likal (1:4) + 3 % D2155	ST
Tronox CR-826 : AG Likal (1:100) + 1 % D2155	DLS
Tronox CR-826 : AG Likal (1:100) + 2 % D2155	DLS
Tronox CR-826 : AG Likal (1:100) + 3 % D2155	DLS
Tronox CR-826 : IPA (1:4)	ST
Tronox CR-826 : IPA (1:100)	DLS
Precheza UVS30 : AG Likal (1:4)	ST
Precheza UVS30 : AG Likal (1:100)	H, PN, DV, DLS, PDA
Precheza UVS30 : AG Likal (1:4) + 3 % D2055	ST
Precheza UVS30 : AG Likal (1:100) + 3 % D2055	DLS
Precheza UVS30 : AG Likal (1:4) + 3 % D2155	H, PN, DV, ST, SVS
Precheza UVS30 : AG Likal (1:10) + 3 % D2155	H, PN, DV, SVS
Precheza UVS30 : AG Likal (1:100) + 3 % D2155	DLS
Precheza UVS30 : IPA (1:4)	ST
Precheza UVS30 : IPA (1:100)	DLS

4.3.5 Měření hustoty

Měření hustoty bylo pro tuto práci klíčové z několika důvodů. Hodnota hustoty vstupuje do vztahů pro predikci dopadu kapky na pevný substrát, tj. vstupuje do vztahu pro dopočet Reynoldsova a Weberova čísla. Stejně tak byla hustota podstatná pro měření povrchového napětí. Pro samotné měření hustoty bylo využito metody měření hmotnosti přesně definovaného objemu kapaliny/suspenze. Ze známé hmotnosti a objemu bylo následně možné dopočítat hustotu ze vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (19)$$

kde ρ je hustota, m je hmotnost a V je objem. Pro zjištění hmotnosti bylo využito analytické váhy Kern ABJ 320-4NM (KERN & SOHN GmbH). Tato váha má opakovatelnost 0,2 mg, skutečný dílek 0,0001 g a ověřitelný dílek 0,001 g.

Kontrolní objem byl na váhu dávkován mikropipetou od společnosti Eppendorf. Jako koncovka dávkovače byla využita špička o maximálním objemu 2,5 ml (nástavec/špička se zeleným proužkem viz Obr. 4-10), která umožňuje dávku 1 dílu o objemu 50 μ l, kdy systematická chyba dávky 50 μ l činí $\pm 0,8 \%$ [60].



Obr. 4-10 Koncovka mikropipety

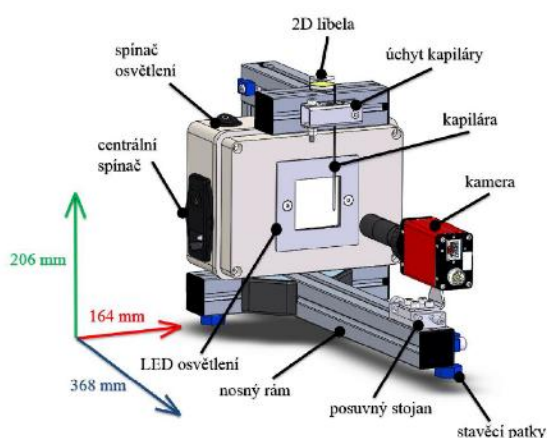
Pro samotné měření byl zvolen kontrolní objem 300 μ l, tj. 6krát dávka základní jednotky 50 μ l. Tento postup byl zvolen záměrně, a to kvůli možnosti fluktuace objemu základní jednotky. Kontrolní objem byl tedy v podstatě průměrem šesti základních dávek.

Kontrolní objem každého vzorku (nosná kapalina nebo suspenze) byl následně zvážen patnáctkrát, aby byl získán širší statistický soubor pro dopočítání průměrné hodnoty hmotnosti. Měřené látky byly suspenze a základní nosné kapaliny uvedené v Tab. 4-4. Veškeré testy byly prováděny při teplotě cca 24 $^{\circ}$ C.

Pro ověření spolehlivosti této metody měření, bylo provedeno měření s vodou, pro kterou byla známa hustota při dané teplotě. Tabulková hodnota hustoty vody při 24 $^{\circ}$ C je 997,3 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [61]. Naměřená hodnota byla 993,5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ s odchylkou $\pm 1,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Lze tedy obecně říci, že průměrná chyba metody je cca 3,8 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.3.6 Měření povrchového napětí

Pro měření povrchového napětí bylo využito zařízení Pendant Drop Meter (PDM). Jednalo se o nekomerční zařízení, které bylo vyrobeno na Ústavu konstruování při VUT FSI v Brně v rámci diplomové práce (viz Obr. 4-11). Zařízení pracuje na principu tzv. zavěšené kapky. Metoda měření je založena na deformaci kapky, která je vytvořena na konci kapiláry. Na kapku působí síla od gravitace, proti které působí síly povrchové. Povrchové napětí je vypočítáno ze zachyceného snímku vytlačené kapky pomocí analýzy obrazu a výpočetního algoritmu [62]. Aby bylo možné ze zachycené kapky dopočítat povrchové napětí, je potřeba znát hustotu měřené kapaliny/suspenze. Pro uvažované suspenze a nosné kapaliny byly použity naměřené hodnoty z měření hustoty.



Obr. 4-11 Pendant Drop Meter [62]

Každý vzorek byl měřen celkem 15 krát, aby byl získán širší statistický soubor naměřených hodnot. Měřené látky byly suspenze a základní nosné kapaliny uvedené v Tab. 4-4. Veškeré testy byly provedeny při teplotě cca 24 °C.

Před samotným měřením suspenzí a nosných kapalin, bylo provedeno zkušební měření pro ověření metody. Pro toto zkušební měření bylo využito měření povrchového napětí vody. Hustota byla do výpočtu dosazena z online tabulek ($997,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) [61], stejně tak byla z těchto tabulek použita i referenční hodnota povrchového napětí ($72,7 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$), ke které bylo výsledné povrchové napětí srovnáváno. Chyba metody, při porovnání teoretické hodnoty s hodnotou naměřenou, byla cca $0,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

4.3.7 Měření dynamické viskozity

Pro získání hodnot dynamické viskozity bylo využito rotačního viskozimetru HAAKE RotoVisco 1 (ThermoFisher Scientific). Zařízení pracuje na principu měření krouticího momentu, který je vyvolán měřenou kapalinou mezi rotující a statickou částí zařízení. Parametry viskozimetru a použité nastavení jsou uvedeny v Tab. 4-5.

Tab. 4-5 Parametry rotačního viskozimetru Haake Rotovisco 1 [63]

Obecné parametry	
Rozsah měřené viskozity (mPa·s)	1 až 105
Točivý moment (mN·m)	0,1 až 50
Otáčky (min ⁻¹)	0,0125 až 1 000
Úhlové rozlišení (μrad)	5
Rozsah teplot (°C)	-20 až +200
Použité nastavení	
Geometrie	DG41 Ti
Teplota	24-25 °C
Mezera u dna	5,1 mm
Měřený objem vzorku	≈ 6,5 ml
Rozsah smykového spádu	≈ 250 – 5000 s ⁻¹

Každý vzorek byl proměřen čtyřikrát, vždy se stejnou posloupností poklesu smykového spádu. Vzorky však měly viskozitu na hranici rozlišitelnosti viskozimetru, což neumožnilo měření suspenzí při nízkých smykových spádech (menší jak cca 100 až 250 s⁻¹). Tento fakt byl dán citlivostí snímače krouticího momentu, který má limitní smykové napětí ≈ 0,4 Pa.

4.3.8 Sedimentační test

Sedimentační test měl za úkol ukázat stabilitu směsí. Míra stability vzorků byla hodnocena na základě vizuální kontroly. Pro sedimentační test byly vybrány vzorky uvedené v Tab. 4-4. Připravené vzorky byly ponechány v klidu po dobu 22 hodin. Stav suspenzí byl pravidelně dokumentován, a to v časech 1 min, 3 min, 5 min, 10 min, 20 min 30 min, 1 hod, 2 hod, 4 hod a 22 hod od vyjmutí vzorků z ultrazvukové čističky. Test probíhal za běžné pokojové teploty okolo 24 °C.

4.3.9 Měření shluků

Pro měření shluků v konkrétních suspenzích bylo využito zařízení Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical Ltd) (viz Obr. 4-12 vlevo). Zetasizer Nano ZS pracuje na principu dynamického rozptylu světla (DLS – „*Dynamic Light Scattering*“). Metoda je vhodná pro měření velikostí v rozmezí cca 0,3 nm - 10 μ m. Technika dynamického rozptylu světla je založena na měření změny intenzity rozptýleného světla z laserového zdroje vůči střední hodnotě tohoto osvětlení. Změna intenzity je způsobena interferenčním zeslabením nebo zesílením světla po dopadu a rozptýlení na částici, která je vlivem Brownova pohybu neustále v pohybu. S nárůstem rychlosti pohybu částice (menší částice se oproti velkým pohybují rychleji) se zvyšuje i rychlost fluktuace intenzity rozptýleného světla. Zetasizer tedy měří de facto fluktuaci intenzity rozptylu světla. Pro získání informace o její velikosti přístroj využívá tzv. digitální korelátor. Ten v podstatě měří míru podobnosti mezi dvěma signály, které jsou po určité době zaznamenány [64–66].



Obr. 4-12 Vlevo - Zetasizer Nano ZS, Vpravo - měřící cela

Při ověřovacím měření se však ukázalo, že Zetasizer má svá omezení. Původním záměrem bylo měřit velikosti shluků v suspenzi s hmotnostním poměrem 1:4. Zde se jako zásadní problém ukázala vysoká koncentrace částic TiO_2 . Výsledkem byla naměřená data s nejednoznačnou distribuční funkcí částic a vysokou polydisperzitou. To bylo způsobeno nemožností úplného prosvícení zkoumaného vzorku suspenze, kdy docházelo k rozptylu světla mezi jednotlivými částicemi, čímž docházelo ke zkreslení výsledků. Řešením bylo měření suspenze s nižší koncentrací TiO_2 . Měření velikosti částic v suspenzích byla následně provedena se suspenzemi s hmotnostním poměrem 1:100 (TiO_2 :Nosná kapalina).

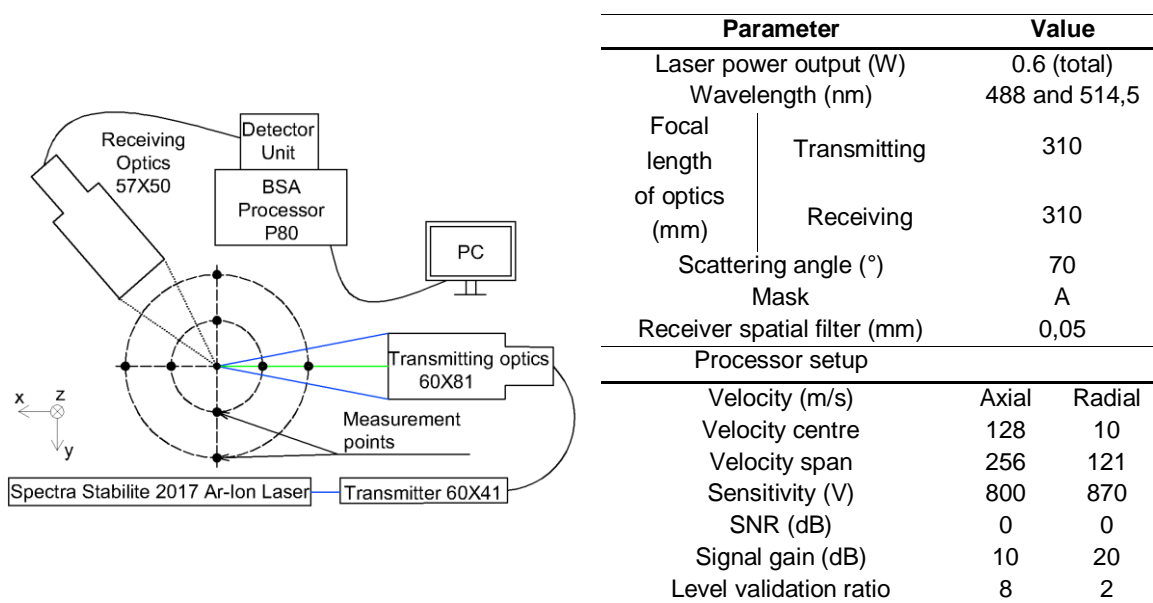
Suspenze, které byly metodou DLS měřeny, byly uvedeny v Tab. 4-4. Z jednotlivých vzorků byl pomocí pipety odebrán kontrolní objem suspenze (cca 1 ml), který byl umístěn do měřící kyvety (viz Obr. 4-12 vpravo), která byla vložena do Zetasizeru. U uvažovaných suspenzí bylo snahou změřit i zeta potenciál, nicméně ten nebylo možné změřit ani pro suspenze v poměru 1:100.

4.4 Studium spreje

4.4.1 Fázová Dopplerovská anemometrie (PDA)

Pro měření velikosti a rychlosti kapek ve spreji bylo využito komerčního fázového Dopplerovského anemometru (PDA) Dantec Dynamics A/S (Skovlunde, Denmark). Měření bylo provedeno ve spolupráci s Laboratoří sprejů pod Energetickým ústavem při VUT FSI v Brně.

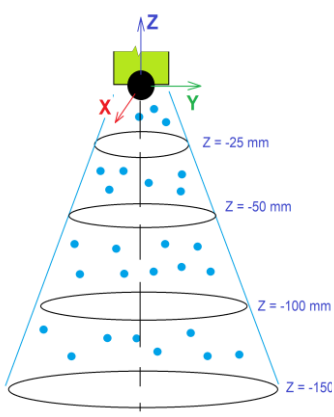
PDA pracuje na principu interferometrie postavené na rozptylu světla. Měření se provádí na jednotlivých kapkách, kdy měřící bod je určen průsečíkem dvou zaměřených laserových paprsků. Kapky prolétávají tímto místem, kde rozptylují světlo od obou laserových paprsků, čímž produkují interferenční vzory. Toto místo je snímáno přijímací optikou, která pomocí fotodetektorů snímá rozptýlené světlo. Přijímač je poté umístěn do vhodné pozice mimo osu laserů. Rychlost kapek se vypočítá z Dopplerovské frekvence signálu z jednoho ze snímačů, zatímco průměr kapky je odvozen z fázového rozdílu dvou signálů ze dvou detektorů [67]. Nastavení systému PDA bylo uvedeno na Obr. 4-13.



Obr. 4-13 Nastavení systému PDA, schéma (vlevo), hlavní parametry (vpravo)

Aby bylo možné získat prostorovou informaci o charakteristikách spreje, bylo měření provedeno v několika osových vzdálenostech a v různých poloměrech od osy spreje (viz Tab. 4-6). Každý měřící bod byl snímán buď po dobu získání 35 000 vzorků, nebo po dobu 10 sekund. Systém PDA byl řízen softwarem Dantec BSA 5.2.

Tab. 4-6 PDA - měřené pole spreje

Schéma	Z (mm)	X, Y (mm)
	-25	$0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6$
	-50	$0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6, \pm 7, \pm 8, \pm 9, \pm 10$
	-100	$0, \pm 2, \pm 4, \pm 6, \pm 8, \pm 10, \pm 12, \pm 14, \pm 16$
	-150	$0, \pm 3, \pm 6, \pm 9, \pm 12, \pm 15, \pm 18, \pm 21$

Plán měření je uveden v Tab. 4-7. Při testovacím měření se ukázalo, že zařízení má problém s měřením velikostí kapek u suspenzí s TiO_2 . Titanová běloba způsobovala v kapkách nežádoucí odraz světla, který vedl k získání dat se šumem. Ten se negativně projevoval ve výsledcích velikostí kapek. V tomto případě bylo možné s jistotou změřit v podstatě jen rychlosti kapek. Pro získání informace o velikostech kapek s vyšší jistotou bylo uděláno zjednodušení, kdy bylo uvažováno měření pouze čistých nosných kapalin. Byl udělán předpoklad, že přítomnost pigmentu nebude mít na velikosti kapek ve vytvořeném spreji v podstatě žádný vliv. Přítomnost pigmentu dle změřených fyzikálních vlastností (viz Tab. 5-3) neměla zásadní vliv na povrchové napětí, nicméně měla vliv na viskozitu. Z práce Ghazanfari [33], kde se zabývali vlivem fyzikálních vlastností kapalin na výstupy membránových atomizérů, bylo patrné, že nárůst viskozity vedl ke snížení velikosti primárních kapek, nicméně změna velikosti (v uvažovaném rozsahu viskozit) zde nebyla až tak markantní. Byl tedy udělán předpoklad, že možná změna v nejčtetnější velikosti kapek bude maximálně v řádech stovek nanometrů. Z hlediska sekundární atomizace pak bylo očekáváno, že proud vzduchu bude mít takovou energii, že se ve všech sprejích bude projevovat dosti podobně.

Na měření čistých nosných kapalin bylo pozorováno, jak se kapaliny s různými fyzikálními vlastnostmi (AG Likal a isopropylalkohol) projeví ve výsledném spreji i z hlediska velikostí kapek. Na primárně uvažovaném ethanolovém prostředku AG Likal byl zkoumán také vliv přetlaku hnacího vzduchu na vytvořený sprej. V tomto případě bylo provedeno i měření bez spuštěného hnacího proudu vzduchu, aby bylo možné určit, jak vypadá atomizérem vytvořená mlha bez jejího urychlení.

Tab. 4-7 Plán měření PDA

Vzorek	Měřené charakteristiky	Přetlak p (bar)
AG Likal	rychlost, velikost kapek	0; 0,5; 1; 1,5
IPA	rychlost, velikost kapek	1
Kronos 2066 + AG Likal (1:4)	rychlost	1
Kronos 2066 + AG Likal (1:100)	rychlost	1
Precheza UVS30 + AG Likal (1:100)	rychlost	1
Tvar ústí nánosové pistole		
Válcové		

V Tab. 4-8 jsou uvedeny průtoky vzduchu, kterými byla při jednotlivých přetlácích napájena ofukovací pistole. Tyto hodnoty byly získány z průtokoměru, který byl v rámci měření na PDA umístěn ve větvi přívodu stlačeného vzduchu do ofukovací pistole.

Tab. 4-8 Objemové průtoky vzduchu

Přetlak p (bar)	Objemový průtok Q (Nm ³ ·hod ⁻¹)
0,5	3,91
1	6,10
1,5	8,01

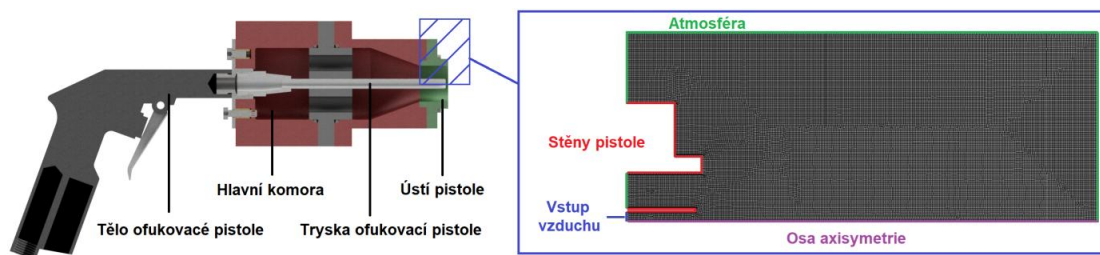
4.4.2 Analýza ústí nánosové pistole

Původní podoba atomizační pistole byla vyvinuta s válcovým ústím. V této části práce bylo snahou analyzovat alternativní tvary ústí a jejich případný vliv na podobu spreje. Pro tuto analýzu bylo využito videozáznamů spuštěného spreje a CFD analýzy provedené v programu Ansys Fluent. V případě CFD analýzy se jednalo o ne zcela triviální úlohu s multifází. Bylo tedy snahou model co nejvíce zjednodušit, ale zároveň aby bylo zachováno to podstatné.

Zjednodušení byla:

- simulace v ustáleném stavu
- zanedbání multifáze
- nestlačitelná tekutina
- 2D axisymetrická úloha

Geometrie použitá při CFD simulaci je znázorněna na Obr. 4-14.



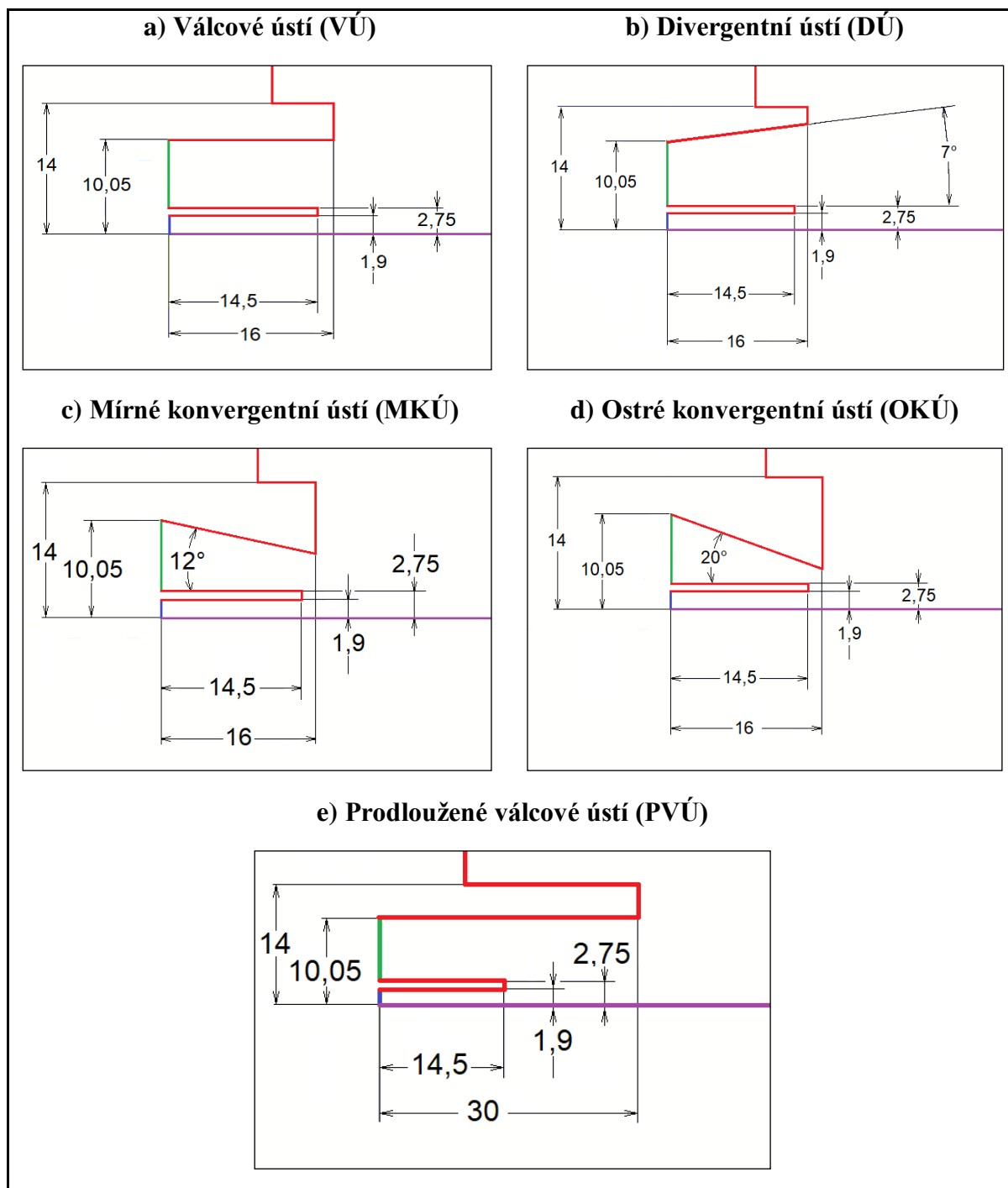
Obr. 4-14 Geometrie CFD analýzy

Nastavení softwaru Ansys Fluent bylo následující:

- Solver: Pressure based
- Turbulentní model: $k-\omega$, SST
- 2D Space: Axisymmetric
- Materiál: Vzduch (hustota i viskozita konstantní)
- Okrajové podmínky z Obr. 4-14:
 - „Vstup vzduchu“ – Mass Flow Inlet
 - „Stěny pistole“ – Wall
 - „Atmosféra“ – Pressure Outlet
 - „Osa axisymetrie“ – Axis
- Mesh: Body Sizing + Refinement (oblast stěn)

Počet prvků meshe byl vybrán na základě testu nezávislosti výpočtové sítě. Výsledky byly vyhodnoceny na základě rychlostních profilů. Byly analyzovány tři různě velké sítě, z čehož dvě poskytovaly téměř identické výsledky. Byly to sítě s 340 000 a 460 000 prvků. Pro další výpočet byla vybrána síť s menším počtem prvků, a tedy s 340 000 prvků.

Na Obr. 4-15 jsou uvedeny rozměry analyzovaných geometrií ústí. Barevné označení jednotlivých hran geometrie se shoduje se schématem uvedeným na Obr. 4-14. Jako výchozí tvar zde byla uvažována původní válcová geometrie s průměrem dutiny 20,1 mm. Geometrie trysky ofukovací pistole byla pro všechny případy totožná, kdy se její vnější a vnitřní průměr rovnal 5,5 mm a 3,8 mm.



Obr. 4-15 Geometrie trysek analyzovaných v rámci CFD, a) Válcové ústí (VÚ), b) Divergentní ústí (DÚ), c) Mírné konvergentní ústí (MKÚ), d) Ostré konvergentní ústí (OKÚ), e) Prodloužené válcové ústí (PVÚ)

4.5 Analýza nástřiků – vliv procesních parametrů

Studium vlivu provozních parametrů bylo provedeno se suspenzí *Kronos2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4. Tato suspenze byla doporučena již v práci Hruboš [1] a stejně tak projevovала nejstabilnější chování při měření vlastností jednotlivých suspenzí. Tab. 4-9 uvádí, které parametry byly pro studium vlivu nastavení pistole uvažovány.

Tab. 4-9 Parametry pro studium vlivu procesních parametrů pistole

Parametr	
Přetlak vzduchu p (bar)	0,1; 0,3; 0,5; 1; 1,5
Ústňová vzdálenost Z (mm)	50; 75; 100; 150
Tvar ústí	Válcové a ostré konvergentní
Rychlost pojezdu v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0,144
Počet nanesených vrstev	1
Orientace ($^{\circ}$)	0
Zmatňovaný objekt	Křemíková destička
Použitá suspenze	Kronos2066 + AG Likal (1:4)
Analýzovaná oblast nástřiku	Celá oblast definovaná upínací maskou ($\approx \varnothing 9$ mm)

Cílem experimentu bylo ověřit vliv tlaku hnacího proudu vzduchu, vzdálenosti zmatňovaného objektu od ústí pistole a tvar jejího ústí na nanesené povlaky. Použité nástřikové zařízení bylo uvedeno v kapitole 4.2.3. Rychlost pojezdu byla nastavena na hodnotu odpovídající přibližně rychlosti pohybu ruky při ruční aplikaci nástřiků. Pro vyhodnocení kvality a charakteru nánosů při různém nastavení byla vybrána jedna vrstva nánosů. Bylo očekáváno, že na jedné vrstvě se nejlépe projeví vliv změn parametrů. Nánosy byly provedeny v konfiguraci, kdy sprej dopadal kolmo na referenční destičku, aby se zabránilo rozkládání rychlosti kapek vlivem případného odklonu destičky. Destička byla nastavována do požadované vzdálenosti pomocí měřidla tak, aby střed ústí pistole směřoval do středu samotné destičky. Nastavení konkrétního tlaku bylo realizováno pomocí externího manometru s rozsahem 0 až 1,6 bar, který byl do vzduchové větve připojen. Díky tomu bylo možné regulátorem nastavit i velmi nízkou hodnotu přetlaku. Pro jednotlivé experimenty byla připravena vždy čerstvá suspenze podle kroků uvedených v kapitole 4.3.4. Posloupnost započítí nánosů byla následující: spuštění atomizace → spuštění hnacího proudu vzduchu → spuštění pojezdového zařízení.

Kvalita povlaku byla vyhodnocována na základě měření jeho tloušťky, % překrytí povrchu, a také na základě kvality naskenovaných dat. Ze získaných dat bylo vybráno nejlepší nastavení jednotlivých parametrů, se kterým byl proveden další experiment zaměřující se na vliv různých suspenzí na kvalitu povlaku (viz kapitola 4.6). O materiálech a metodách využitých při měření charakteristik nástřiku pojednávají podkapitoly níže.

4.5.1 Zmatňované objekty

Jako referenční zmatňované objekty byly používány křemíkové destičky, jejichž specifikace je uvedena v Tab. 4-10. V případě těchto destiček lze hovořit o problematickém povrchu, který by bez aplikace nástřiku nebylo možné naskenovat. Výhodou destiček je jejich dobrá rovinnost, která byla požadována především při měření tloušťky nanesené vrstvy a při analýze 3D skenů.

Tab. 4-10 Parametry křemíkové destičky

Parametr	
Rozměr	(15 × 15 × 1) mm
Rovinnost	< 400 nm
Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra	≈ 1 nm

4.5.2 Měření tloušťky nanesené vrstvy

Pro měření tloušťky nanesených nástřiků na referenčních destičkách bylo využito dotykového profilometru Bruker DektakXT (Bruker). I přesto, že je tento profilometr dotykový, je možné vrstvu nasnímat bez jejího porušení, a to díky velmi nízké hodnotě přítlaku dotykové jehly (tzv. stylus). Nastavení, které bylo použité při měření, je uvedeno v Tab. 4-11.

Tab. 4-11 Parametry dotykového profilometru Bruker DektakXT

Použité nastavení	
Typ snímání	Standard Scan
Rozsah	65,5 μm
Typ měřeného profilu	Hills
Poloměr stylu	12,5 μm
Přítlak stylu	3 mg
Doba snímání	160 s

Měření byly nánosy na referenčních křemíkových destičkách. Aby bylo možné rozeznat, kde byl nános a kde byl povrch samotné destičky, byla při nástřiku část destičky zakryta upínací maskou (viz Obr. 4-8). Tím bylo docíleno toho, že část povrchu nebyla zmatněna, a byla tak vytvořena nulová referenční hladina, odkud byly tloušťky měřeny. Před samotným měřením profilu byl nástřik ofouknut mírným proudem vzduchu z čistícího balónku, aby byly odstraněny případné prachové částice, které by měření mohly ovlivňovat. Naměřená data byla dále zpracována softwarem Vision64 (Bruker). Pro eliminaci vlnitosti profilu bylo využito funkce *Terms Removal (F-Operator)*. Pro analýzu topografie bylo využito funkcí *Profile Filter* a *Profile Stats*, kdy byla vyhodnocována průměrná výška profilu R_c .

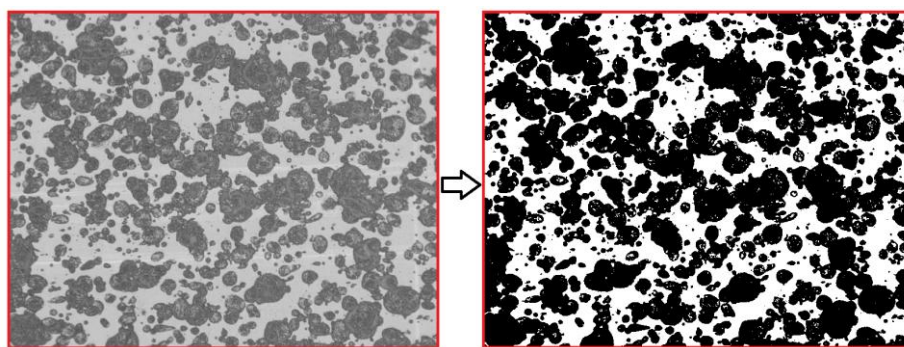
4.5.3 Měření překrytí povrchu

Měření překrytí povrchu bylo provedeno na zmatněných referenčních destičkách. Před snímáním byl povrch stejně jako u měření profilu ofouknut čistícím balónkem pro odstranění prachových částic. Pro zachycení nástřiků bylo využito digitálního mikroskopu Keyence VHX-6000 (Keyence Corporation). Parametry tohoto mikroskopu a použité nastavení jsou uvedeny v Tab. 4-12.

Tab. 4-12 Parametry digitálního mikroskopu Keyence VHX-6000

Obecné parametry	
Senzor kamery	1/1,8 inch CMOS (1600 × 1200)
Osvětlení	High-brightness LED
Optika	High-magnification Zoom Lens VH-Z250R/Z250T
Použité nastavení	
Zvětšení	250×
FOV	1,22 × 0,92 mm
Proces snímání	2D Stitching

Pro vyhodnocení získaných snímků bylo využito softwaru ImageJ. Metoda zpracování snímků pro analýzu překrytí byla následující. Snímek zachycený mikroskopem byl rozdělen z barevného prostoru na složky RGB. Z těchto tří rozdělených snímků byl vybrán ten s nejrovnoměrnější intenzitou jasu, který byl následně převeden na binární obraz (viz Obr. 4-16, kde tmavé oblasti definují nanosený povlak). Hranice intenzity pro převod do binárního prostoru (tzv. *threshold*), byla vybrána funkcí *Mean* (pro snímky s bílým pozadím) nebo funkcí *Default* (pro snímky s černým pozadím). Takový snímek poté nabízel možnost rozeznat, kde povlak je a kde nikoliv a umožňoval tak stanovit % překrytí referenčního objektu nástřikem. Pro tuto analýzu bylo využito funkce *Measure*.



Obr. 4-16 Převod snímku nástřiku do binárního prostoru (tmavé oblasti = povlak)

4.5.4 3D skenování

Samotná metoda nánosu byla vyvíjena specificky pro skener Atos III Triple Scan (GOM GmbH), respektive pro skenery s proužkovou projekcí. Princip používaného skeneru Atos III Triple Scan je založen na aktivní triangulaci, kdy je využito stereovizní metody snímání a projekce specifických vzorů. Osvětlení skeneru je založeno na tzv. „*Blue Light Technology*“ s úzkým pásmem použité vlnové délky [68, 69]. Parametry použitého 3D skeneru a jeho nastavení jsou uvedeny v Tab. 4-13.

Tab. 4-13 Parametry skeneru ATOS III Triple Scan [68]

Obecné parametry	
Rozlišení kamer	2 × 8 Mpx
Senzor	ATOS III Rev. 02
Promítané světlo	400-500 nm
Promítaný vzor	Strukturované světlo s fázovým posuvem
Použité nastavení	
Pozice kamer	SO
Měřící objem	MV60 (60 × 45 × 35) mm
Nejmenší vzdálenost měřených bodů	0,017 mm
Měřící vzdálenost	490 mm
Expoziční čas	50 ms
Automatizované skenování	Lift a rotační stůl
Orientace skenování křemíkové destičky	0° a 45°
Polygonizace a postprocessing	Standard



Obr. 4-17 Atos III Triple Scan na snímací sestavě Lift

Celý proces 3D skenování byl automatizován pomocí sestavy s vertikálním posuvem skeneru a rotačním stolkem se dvěma osami otáčení (viz Obr. 4-17). Tato sestava bude dále označována jako *Lift*. Referenční destička byla v tomto případě skenována ve dvou orientacích. V první sadě měření byla destička orientována kolmo ke skenovací hlavě, zatímco v druhé sérii byla skloněna o 45°. Dvojí orientace byla zvolena záměrně kvůli rozdílným směrům odražení světla (emitovaného skenerem) od povrchu.

4.5.5 Zpracování naskenovaných dat

Naskenovaná data byla polygonizovaná a zpracována výchozí funkcí *Standard* a zpracována v rámci softwaru GOM Inspect (GOM GmbH). Naskenovanými body byla proložena referenční rovina pomocí metody *Gaussian best-fit* s výběrem bodů z oblasti 3σ . Kvalita naskenovaných dat byla vyhodnocována na základě odchylky jednotlivých bodů od referenční roviny a na základě velikosti zachycené plochy. Kvalitní sken by měl obsahovat dostatečné množství bodů (které definují zachycenou oblast) s nízkou hodnotou odchylky od referenční roviny.

4.6 Analýza nástřiků – vliv suspenzí

Pro tento test bylo z předchozího experimentu vybráno doporučené nastavení přetlaku hnacího vzduchu, vzdálenost ústí od objektu a konkrétní tvar ústí. Cílem bylo zjistit vliv různých suspenzí na kvalitu naneseného povlaku. Kromě typu nosné kapaliny a titanové běloby zde byl ověřen také vliv počtu nanesených vrstev. Lze očekávat, že suspenze s horšími optickými vlastnostmi bude pro docílení kvalitního nánosu (pro účely

3D skenování) potřebovat více nanesených vrstev. Ideální suspenze by tedy měla být taková, která vytvoří co nejtenčí vrstvu a zároveň bude mít dobré optické vlastnosti, které se projeví dobrou kvalitou naskenovaných dat. I v tomto případě bylo vyhodnocováno % překrytí povrchu (viz kapitola 4.5.3), tloušťka vrstvy (viz kapitola 4.5.2) a kvalita 3D skenu (viz kapitoly 4.5.4 a 4.5.5). Nastavení systému, které bylo v rámci této analýzy použito, je uvedeno v Tab. 4-14.

Tab. 4-14 Parametry pro studium vlivu suspenzí na nástřik

Parametr	
Přetlak p (bar)	0,5
Ústňová vzdálenost Z (mm)	50
Tvar ústí	Ostré konvergentní
Rychlost pojezdu v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0,144
Počet vrstev	1, 2, 4, 6
Orientace pistole ($^{\circ}$)	0
Zmatňovaný objekt	Křemíková destička
Použité suspenze	Kronos 2066 + AG Likal (1:4)
	Kronos 2066 + AG Likal (1:10)
	Kronos 2066 + IPA (1:4)
	Tronox CR-826 + AG Likal (1:4) + 2 % D2055
	Tronox CR-826 + AG Likal (1:10) + 2 % D2055
	Precheza UVS30 + AG Likal (1:4) + 3 % D2155
	Precheza UVS30 + AG Likal (1:10) + 3 % D2155
Analyzovaná oblast nástřiku	Čtverec (4×4) mm ve středu nánosu

4.7 Skenování reálných objektů

Skenování reálných objektů mělo za úkol ukázat robustnost této zmatňovací metody za běžných pracovních podmínek. V tomto případě byly nánosy vytvářeny bez řízeného posuvu kvůli ověření použitelnosti pro ruční aplikace. I přesto však byly dodržovány podmínky nánosu, které vycházely jako nejlepší z analýzy vlivu procesních parametrů. Stejně tak byla na základě analýzy vlivu suspenzí použita suspenze s nejlepšími vlastnostmi. Z důvodu větších rozměrů použitých součástí byla pro 3D skenování použita větší optika skeneru, a to MV170. Parametry této optiky jsou uvedeny v Tab. 4-15. Expoziční čas byl nastavován dle aktuálního skenování tak, aby nedocházelo k výskytu přeexponovaných oblastí na zmatněných plochách. Její hodnota však nebyla vyšší

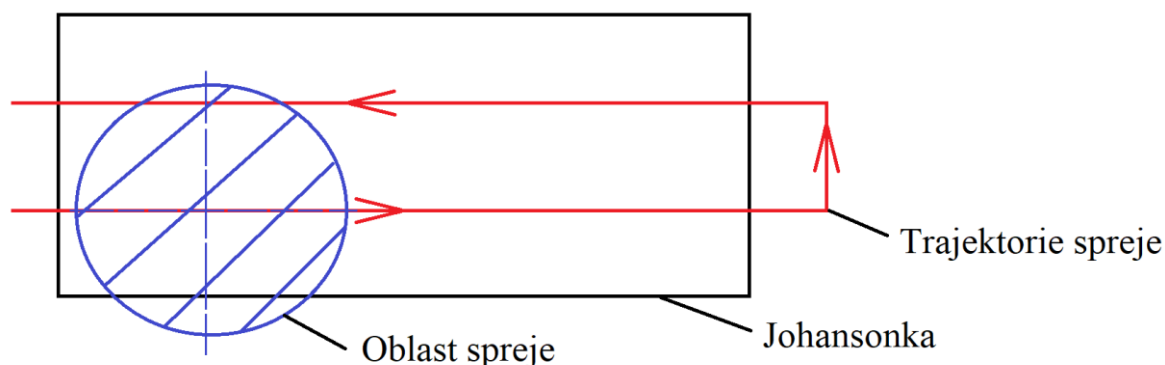
jak ≈ 80 ms. Polygonizace a zpracování získaných dat byly provedeny stejnou funkcí jako v případě předchozích analýz, a tedy výchozí funkcí *Standard*.

Tab. 4-15 Parametry skenovací optiky MV170

Parametr	
Pozice kamer	SO
Měřicí objem	MV170 (170 × 130 × 130) mm
Nejmenší vzdálenost měřených bodů	0,055 mm
Měřicí vzdálenost	490 mm

Johanssonova měrka

Prvním z měřených objektů byla Johanssonova měrka o nominálním rozměru 50 mm s třídou přesnosti 2. Odchylka střední délky tohoto objektu byla dle kalibračního listu $+0,24 \mu\text{m}$. Johansonka byla vybrána nejenom z důvodu přesné znalosti jejího základního rozměru, ale také proto, že tento objekt je velmi problematické nasnímat bez jeho zmatnění. Nástřiky byly provedeny na plochách definujících základní rozměr 50 mm s dvěma vrstvami s mírným překryvem (viz Obr. 4-18). Pro získání širšího statického souboru dat byla tato měrka zmatněna a naskenována třináctkrát nezávisle po sobě.



Obr. 4-18 Princip aplikace zmatňujícího nástřiku na Johansonku

Pro měření nominální délky Johansonky bylo využito prostředí programu GOM Inspect (GOM GmbH). Postup jejího vyhodnocení byl následující. Plochami, které tvořily základní rozměr, byly proloženy referenční roviny pomocí funkce *Gaussian best-fit* s výběrem bodů z oblasti 3σ . Základní rozměr byl poté měřen pomocí bodu vytvořeného na jedné z referenčních rovin. Tento bod byl následně promítnut do protilehlé referenční roviny pomocí funkce *Construct Projected Point Distance*, která také umožnila odečíst výsledný rozměr. Hodnota základního rozměru jednoho konkrétního vzorku byla získána zprůměrováním hodnot z šesti takto provedených měření podél šířky měrky.

Úhelník s příložkou

Druhým dílem, který byl v rámci této kapitoly skenován, byl úhelník s příložkou (viz Obr. 4-19). Na tomto dílu byl zkoumán vliv nánosu na ostrý tvarový přechod. Výsledný sken byl analyzován v prostředí programu GOM Inspect (GOM GmbH). Vyhodnocení vzniklého rádiusu bylo následující. Vzniklým rádiusem byl proložen válec funkcí *Construct Fitting Cylinder* pomocí metody *Gaussian best-fit*. Oblast výběru bodů byla 3σ . Výsledný rádius byl odečten přes funkci *Check Dimensions* → *Radius*. Počet vrstev nástřiku v tomto případě odpovídal přibližně šesti přejezdům spreje přes oblast ostrého tvarového přechodu.



Obr. 4-19 Úhelník s příložkou

5 VÝSLEDKY

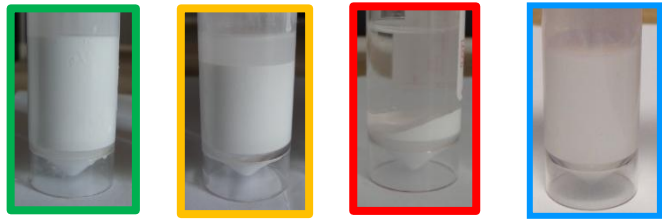
5.1 Sedimentační test

Výsledky sedimentačního testu jsou schematicky znázorněny v Tab. 5-1. Vyhodnocení stavu sedimentace bylo provedeno na základě vizuální kontroly. Stav vzorků byl hodnocen čtyřmi stupni stavu suspenzí. První stav byl „*Bez vizuálně patrné sedimentace*“. Tuto charakteristiku nesly vzorky, u kterých nebyla na první pohled patrná sedimentace a nebylo tak možné pozorovat rozhraní mezi nosnou kapalinou a usedlou pevnou fází (práškem TiO_2). Druhý stav byl označen jako „*Sedimentace – poloha rozhraní koncentrací $\geq \frac{1}{2}$ výšky hladiny*“. Třetí stav byl označen jako „*Sedimentace – poloha rozhraní koncentrací $< \frac{1}{2}$ výšky hladiny*“. Poslední dva zmiňované stavy značily de facto postup sedimentace. Posledním stavem byl „*Sediment u dna (rozhraní není patrné)*“, který se objevoval u suspenzí s práškem UVS30. Směsi s práškem UVS30 se obecně chovaly nestabilně. Zde se u dna objevovala koncentrovaná fáze, která svou konzistencí připomínala kaši. Prostředek Disperbyk byl v tomto případě schopný sedimentaci potlačit (tj. nebylo na první pohled jednoznačně patrné rozhraní různých koncentrací), nicméně i přesto byl fenomén „kaše“ ve vzorcích přítomen. To stejné platilo i pro suspenze s isopropylalkoholovou nosnou kapalinou.

Při porovnání směsí *Kronos 2066 + IPA* a *Kronos 2066 + AG Likal* nebylo vizuální kontrolou možné pozorovat rozdíly a obě směsi se z hlediska usazování částic jevily velmi stabilně. Prostředek Disperbyk u směsí *AG Likal + Kronos 2066* sedimentaci naopak podněcoval. V tomto případě bylo možné spatřit sedimentaci již po cca 3 až 5 minutách.

U směsí s práškem Tronox CR-826 se jako nestabilní ukázaly být suspenze s isopropylalkoholem a AG Likal bez přidání Disperbyku, kdy pevná fáze začala téměř okamžitě sedimentovat. Prostředek Disperbyk byl v tomto případě účinný a byl schopný sedimentaci směsí s ethanolovou nosnou kapalinou výrazně potlačit.

Tab. 5-1 Výsledky - sedimentační test

Legenda											
Bez vizuálně patrné sedimentace											
Sedimentace - Poloha rozhraní koncentrací ≥ 1/2 výšky hladiny											
Sedimentace - Poloha rozhraní koncentrací < 1/2 výšky hladiny											
Sediment u dna (rozhraní není patrné)											
											
Suspenze s Kronos 2066	1 min	3 min	5 min	10 min	20 min	30 min	1 hod	2 hod	4 hod	22 hod	
Kronos 2066 + AG Likal (1:4)											
Kronos 2066 + AG Likal (1:4) + 3 % D2055											
Kronos 2066 + AG Likal (1:4) + 3 % D2155											
Kronos 2066 + IPA (1:4)											
Suspenze s Tronox CR-826	1 min	3 min	5 min	10 min	20 min	30 min	1 hod	2 hod	4 hod	22 hod	
Tronox CR-826 + AG Likal (1:4)											
Tronox CR-826 + AG Likal (1:4) + 3 % D2055											
Tronox CR-826 + AG Likal (1:4) + 3 % D2155											
Tronox CR-826 + IPA (1:4)											
Suspenze s Precheza UVS30	1 min	3 min	5 min	10 min	20 min	30 min	1 hod	2 hod	4 hod	22 hod	
Precheza UVS30 + AG Likal (1:4)											
Precheza UVS30 + AG Likal (1:4) + 3 % D2055											
Precheza UVS30 + AG Likal (1:4) + 3 % D2155											
Precheza UVS30 + IPA (1:4)											

5.2 Měření shluků

Výsledky měření velikosti částic metodou DLS jsou uvedeny v Tab. 5-2. Hodnoty částic byly v tomto případě průměrné hodnoty ze tří provedených měření. Při porovnání výsledků měření shluků se sedimentačním testem bylo patrné, že data spolu korespondují. U suspenzí, které měly tendenci výrazně sedimentovat, byl tento fakt podložen i posunutím průměrné velikosti částic (posunutí vrcholu distribuční funkce) k vyšším hodnotám. Distribuční křivky jednotlivých vzorků jsou uvedeny na Obr. 5-1.

Tab. 5-2 Průměrná velikost částic TiO₂ v jednotlivých suspenzích

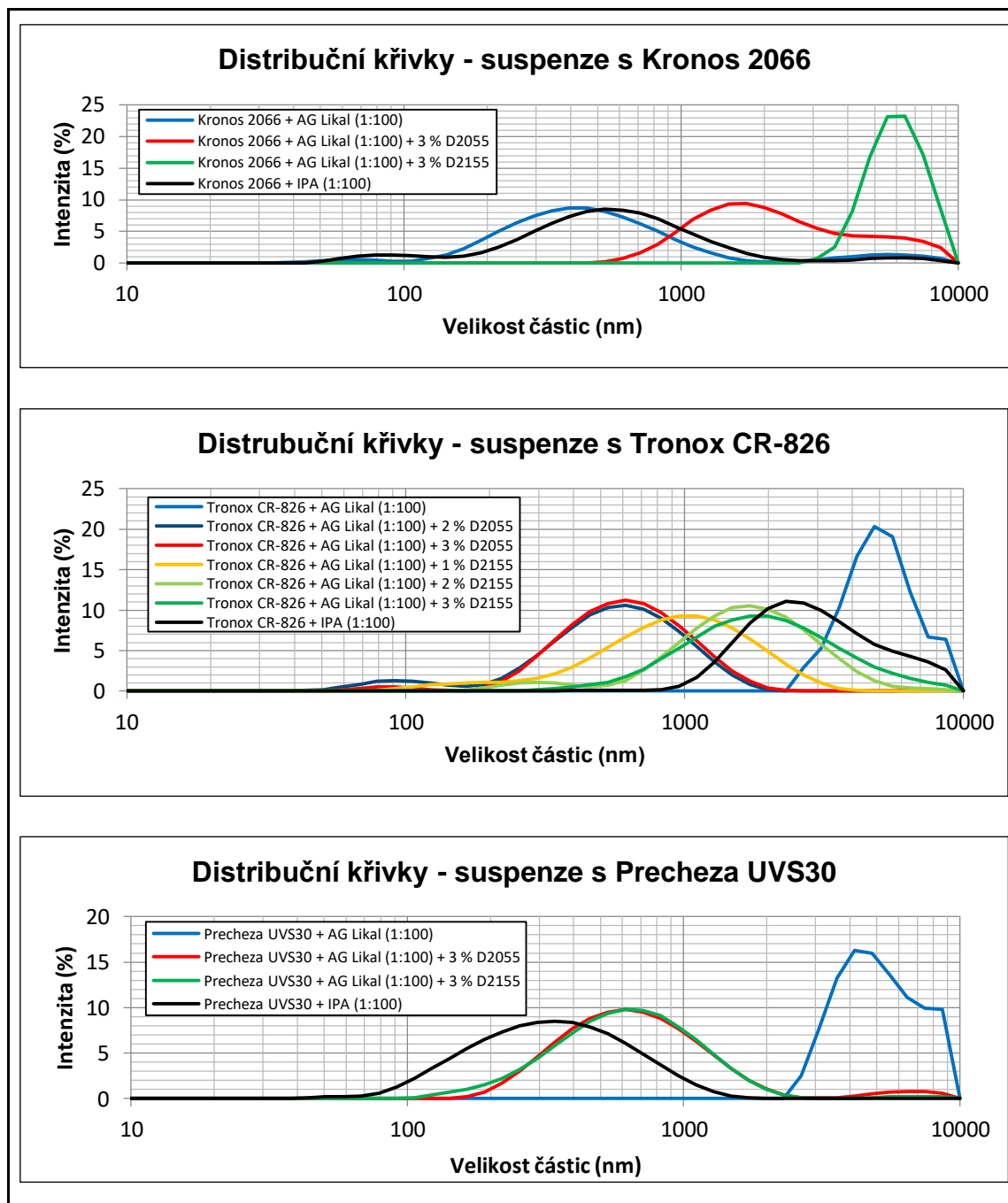
Suspenze	Průměrná velikost částic (nm)
Kronos 2066 + AG likal	365,5
Kronos 2066 + AG Likal + 3 % D2055	1756
Kronos 2066 + AG Likal + 3 % D2155	5647
Kronos 2066 + IPA	407,8
Tronox CR-826 + AG Likal	4887
Tronox CR-826 + AG Likal + 2 % D2055	424,5
Tronox CR-826 + AG Likal + 3 % D2055	492,2
Tronox CR-826 + AG Likal + 1 % D2155	694,7
Tronox CR-826 + AG Likal + 2 % D2155	1261
Tronox CR-826 + AG Likal + 3 % D2155	1413
Tronox CR-826 + IPA	2558
Precheza UVS30 + AG Likal	4892
Precheza UVS30 + AG Likal + 3 % D2055	565,1
Precheza UVS30 + AG Likal + 3 % D2155	516,8
Precheza UVS30 + IPA	273,5

Z výsledků bylo patrné, že suspenze *Kronos 2066 + AG Likal* (bez přidání Disperbyku) a *Kronos 2066 + IPA* byly ze všech suspenzí těmi nejstabilnějšími. Zde bylo dosaženo průměrné velikosti částic okolo 365,5 nm a 407,8 nm, což bylo velmi blízké mediánové hodnotě primární velikosti částic, kterou udává výrobce (≈ 340 nm). Je však nutno říci, že distribuční funkce byly v těchto případech poměrně dost široké. Zastoupení velikostí částic zde bylo v rozmezí cca 140 až 1 300 nm. V případě suspenzí s práškem Kronos 2066 se projevil vliv Disperbyku negativně. U těchto vzorků vedlo přidání disperzantu ke zvětšení velikosti částic (shluků), a tudíž i k posunu maxima distribuční funkce k vyšším hodnotám.

U čistých suspenzí prášku Tronox CR-826 s AG Likal (bez Disperbyku) a s IPA byla pozorována téměř okamžitě sedimentace. Tomu odpovídala i vysoká průměrná velikost shluků, která byla u suspenze s AG Likal 4 887 nm a u suspenze s IPA okolo 2 558 nm. V případě suspenzí s titanovou bělobou Tronox se pozitivně projevila funkce Disperbyku. Ten byl schopný průměrnou velikost částic snížit a posunout tak distribuční funkci k menším hodnotám. Nejmenší průměrná velikost částic 424,5 nm byla dosažena v případě směsi s 2 % D2055. Ani v tomto případě však nebylo dosaženo průměrné velikosti, která by se rovnala primární velikosti ≈ 200 nm, deklarovanou výrobcem.

U suspenzí s práškem UVS30 se nejvíce ukázal vliv nosné kapaliny. V případě čisté suspenze s AG Likal (bez Disperbyku) se jednalo o méně stabilní směs, která začala viditelně sedimentovat již po přibližně 30 minutách. To se projevilo i u měření velikosti částic, kdy jejich průměrná velikost byla 4 892 nm. Suspenze na bázi IPA obsahovala

nejmenší průměrnou velikost částic (273,5 nm) ze všech suspenzí s UVS30. I přesto se však tato hodnota nepřiblížila primární velikosti deklarované výrobcem (40 nm), což značilo přítomnost velkých agregátů. Přidáním prostředku Disperbyk bylo možné sedimentaci mírně potlačit, nicméně i přesto byla průměrná velikost částic v těchto suspenzích značně vysoká: 565,1 nm (s 3 % D2055) a 516,8 nm (s 3 % D2155).



Obr. 5-1 Distribuce velikosti částic TiO₂ v jednotlivých suspenzích

5.3 Fyzikální vlastnosti suspenzí

V Tab. 5-3 je uveden celkový přehled fyzikálních vlastností suspenzí, které byly v rámci práce dále používány. Hustota látek v tomto případě rostla se zvyšujícím se podílem titanové běloby. Přidání pigmentu do nosné kapaliny vedlo k mírnému snížení povrchového napětí, nicméně tato změna byla v podstatě zanedbatelná.

Tab. 5-3 Fyzikální vlastnosti použitých suspenzí

Látka	ρ (kg·m ³)	σ (mN·m ⁻¹)	τ_0 (Pa)	n (-)	K (mPa·s ⁿ)	η (mPa·s)
AG Likal	814	23,7	-	-	-	1,651
Kronos 2066 + AG Likal (1:4)	965	23,2	-	-	-	2,168
Kronos 2066 + AG Likal (1:10)	877	23,5	-	-	-	1,850
Kronos 2066 + AG Likal (1:100)	821	23,7	-	-	-	1,719
Tronox CR-826 + AG Likal (1:4) + 2 % D2055	960	23,0	-	-	-	2,441
Tronox CR-826 + AG Likal (1:10) + 2 % D2055	854	22,9	-	-	-	2,313
Precheza UVS30 + AG Likal (1:4) + 3 % D2155	940	22,8	1,45	0,75	37,89	-
Precheza UVS30 + AG Likal (1:10) + 3 % D2155	850	22,8	0,25	0,85	10,44	-
Precheza UVS30 + AG Likal (1:100)	817	23,7	-	-	-	1,765
IPA	775	21,0	-	-	-	2,485
Kronos 2066 + IPA (1:4)	912	20,6	-	-	-	2,722

Z hlediska měření dynamické viskozity bylo patrné, že suspenze vykazovaly časově závislé chování, kdy se naměřená okamžitá viskozita s časem posouvala k vyšším hodnotám. První měření, u většiny případů, vykazovalo nižší hodnoty okamžité dynamické viskozity v porovnání se čtvrtým měřením (tj. posledním ze série měření). Vysvětlení tohoto jevu bylo založeno na úvaze, že suspenze se stále mění. Zde lze očekávat, že suspenze je do jisté míry nestabilní a dochází k fluktuaci velikosti částic vlivem agregace, případně ke změně koncentrace napříč vzorkem vlivem sedimentace. Jedním z možných vlivů mohla být i postupná změna koncentrace suspenze, jelikož použité alkoholy jsou těkavými látkami, kdy dochází k jejich postupnému odpařování. Zde se však jedná o minimální úbytek objemu nosné kapaliny. Tomuto faktoru tedy nebyl přisuzován takový význam.

Při prokládání naměřených dat z rheometru byl využit program Matlab, kde bylo využito nástroje *Curve Fitting*. Prokládána byla data ze čtyř provedených měření a kvalita proložení byla hodnocena na základě hodnoty *R-square*. Nejlépe z hlediska hodnoty *R-square* vycházel model Herschel-Bulkley, který měl téměř ve všech případech hodnotu *R-square* > 0,9992. Matematický zápis tohoto modelu je:

$$\tau = \tau_0 + K\gamma^n \quad (20)$$

kde τ je smykové napětí, τ_0 je mez tečení, K je koeficient konzistence, γ je smykový spád, n je index tokového chování.

Ze získaných výsledků bylo patrné, že viskozita látek rostla s nárůstem koncentrace pigmentu. V podstatě všechny suspenze a nosné kapaliny poté vykazovaly téměř newtonské chování, čemuž odpovídaly indexy tokového chování blížíící se hodnotě 1 a meze tečení s téměř nulovými hodnotami. U těchto suspenzí byla dopočtena dynamická viskozita η a byly dále chápány jako newtonské. Výrazné nenewtonské chování bylo pozorováno především u suspenzí s titanovou bělobou UVS30 s vyššími hmotnostními podíly. Zde se výrazněji projevovalo smykově řidnoucí chování, kdy okamžitá hodnota dynamické viskozity výrazně klesala se zvyšujícím se smykovým spádem. Stejně tak byla u těchto suspenzí vyšší hodnota meze tečení, která byla již řádově v desetinách až jednotkách pascalů. To bylo zřejmě způsobeno projevem sedimentace, která v tomto případě měla kašovitou konzistenci (viz kapitola 5.1). Výraznější nenewtonské chování s mezí tečení mohlo být v případě suspenzí s UVS30 způsobeno také tím, že tento pigment má v porovnání s práškem Kronos 2066 a Tronox CR-826 menší objemovou hustotu. Tj. aby bylo v suspenzi dosaženo určitého hmotnostního podílu tohoto prášku, je potřeba přidat opticky více UVS30, v porovnání s ostatními prášky.

5.4 Studium spreje

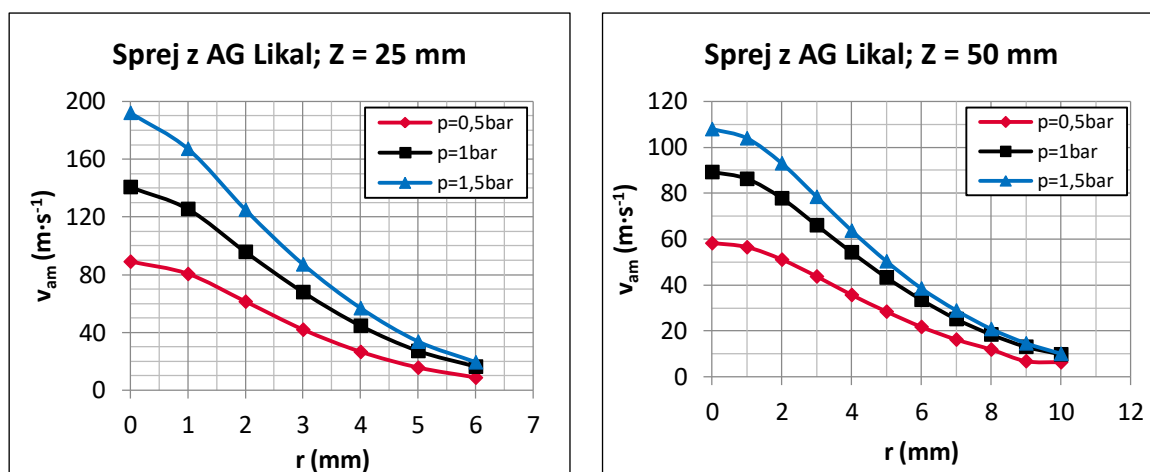
Před tím než byly provedeny testy zaměřené na depozici zmatňujících nástřiků, byla studována samotná tvorba spreje a jeho chování během provozu. Získaná data pak byla konfrontována s výsledky provedených analýz zabývajících se vlivem procesních parametrů na nástřík.

5.4.1 Výsledky PDA

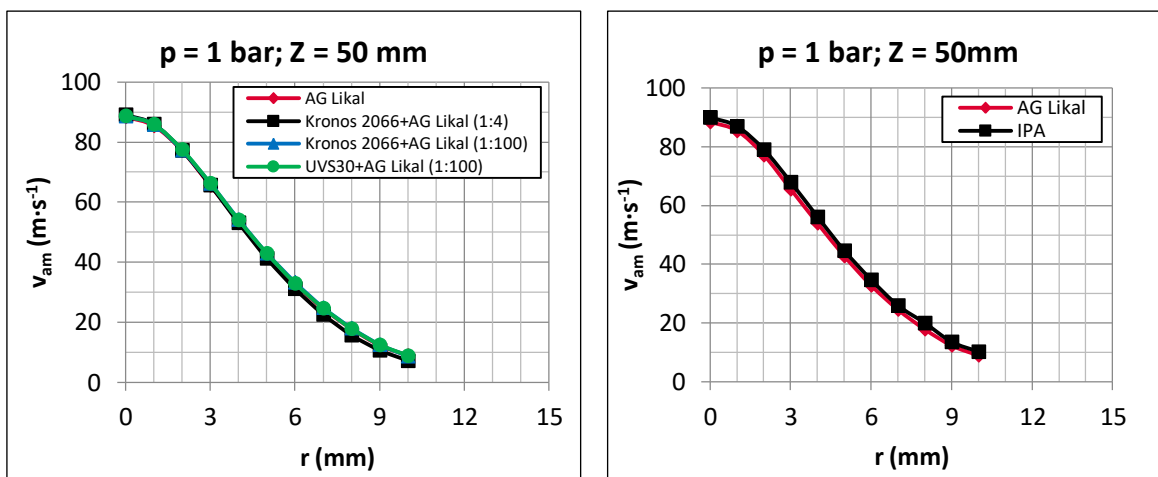
Získaná data, která byla uvedena v grafech, byla zpracována následujícím způsobem. Jelikož byl vzniklý sprej osově souměrný, byla jednotlivá data zprůměrována po poloměru spreje. Tj. například data v poloměru spreje $r = 2 \text{ mm}$ v určité axiální vzdálenosti od ústí Z byla získána tak, že v dané úst'ové vzdálenosti byla data zprůměrována z míst měření $X = 2 \text{ mm}$, $X = -2 \text{ mm}$, $Y = 2 \text{ mm}$ a $Y = -2 \text{ mm}$.

Rychlostní profil spreje

Ze získaných výsledků bylo patrné, jak se hnací proud vzduchu projevuje ve výsledném spreji. Spuštění hnacího proudu vzduchu v tomto případě umožňovalo vytvořit sprej s typickým kuželovitým tvarem, který se choval jako stabilní vírová struktura. Ze změřených profilů axiální rychlosti kapek bylo evidentní, že pigment ani různé nosné kapaliny neměly na rychlostní pole žádný vliv (viz Obr. 5-3). Distribuce axiální rychlosti byla v tomto případě dána tvarem trysky ofukovací pistole, velikostí přetlaku hnacího proudu vzduchu p a osovou vzdáleností od ústí pistole Z (viz Obr. 5-2). Distribuce rychlostí kapek napříč poloměrem spreje pak svým tvarem odpovídaly typické zvonové křivce.

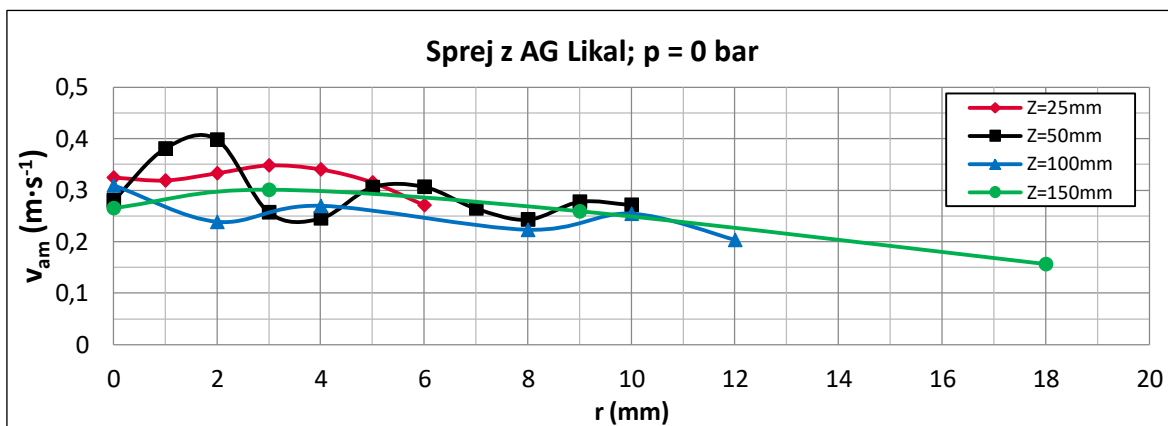


Obr. 5-2 Průměrná axiální rychlost kapek ve spreji z ethanolového prostředku AG Likal v závislosti na poloměru spreje



Obr. 5-3 Průměrná axiální rychlost kapek ve sprejích z různých kapalin a suspenzí v závislosti na poloměru spreje

V rámci měření na PDA byl měřen také sprej bez spuštěného centrálního proudu vzduchu. Závislost jeho průměrné axiální rychlosti na poloměru spreje a ústové vzdálenosti je uvedena na Obr. 5-4. V tomto případě byl měřen sprej z ethanolového přípravku AG Likal.



Obr. 5-4 Průměrná axiální rychlost kapek při vypnutém hnacím proudu vzduchu

Z grafu na Obr. 5-4 je možné spatřit, že rychlosti kapek vyprodukované pouze atomizérem byly v průběhu všech ústových vzdáleností rovnoměrné, s hodnotami v rozmezí cca $0,2$ až $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. To potvrdilo úvahu, že na zrychlení kapek ve spreji měl vliv pouze hnací proud vzduchu.

Aby bylo možné stanovit rychlosti spreje i pro jiné přetlaky a ústové vzdálenosti, než pro ty, které byly měřeny na PDA, byl pro jejich odhad vytvořen matematický model. Ten vycházel z vývoje axiální rychlosti po poloměru spreje, kterému nejlépe odpovídala Gaussova funkce. Model by měl umožňovat predikci od ústové vzdálenosti cca $Z = 25 \text{ mm}$ a má tuto podobu:

$$v_{axial} = a \cdot \exp\left(-\left(\frac{r-b}{c}\right)^2\right) \quad (21)$$

$$a = a_0 \cdot p^{0,6047} \quad (22)$$

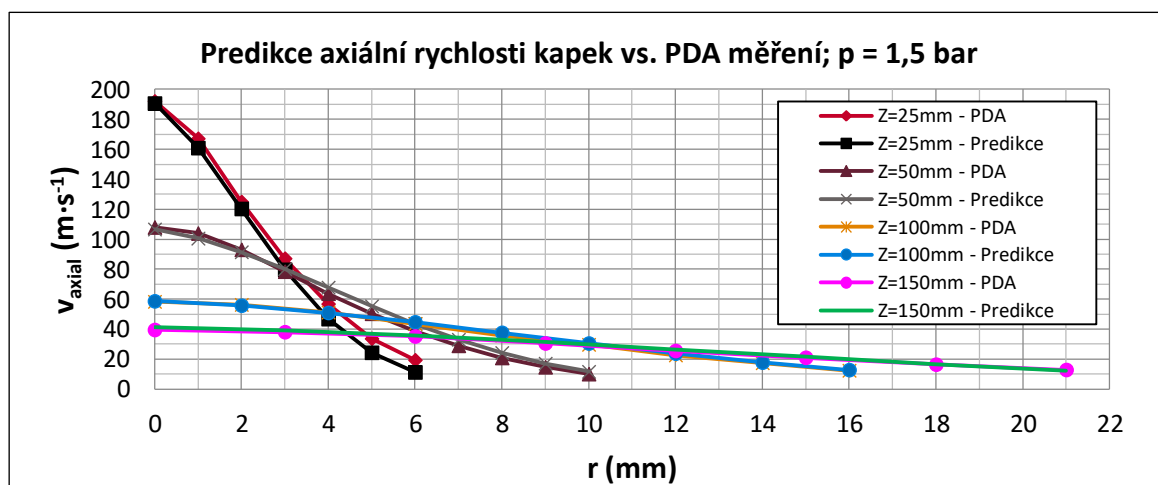
$$a_0 = 2636,3 \cdot Z^{-0,877} \quad (23)$$

$$b = -0,0088 \cdot Z - 0,6807 \quad (24)$$

$$c = 0,1346 \cdot Z + 0,6983 \quad (25)$$

v_{axial} je axiální rychlost kapky v metrech za sekundu, a , a_0 , b , c jsou predikční koeficienty, r je poloměr spreje v milimetrech, p je přetlak hnacího proudu vzduchu v barech a Z je úst'ová (axiální) vzdálenost v milimetrech.

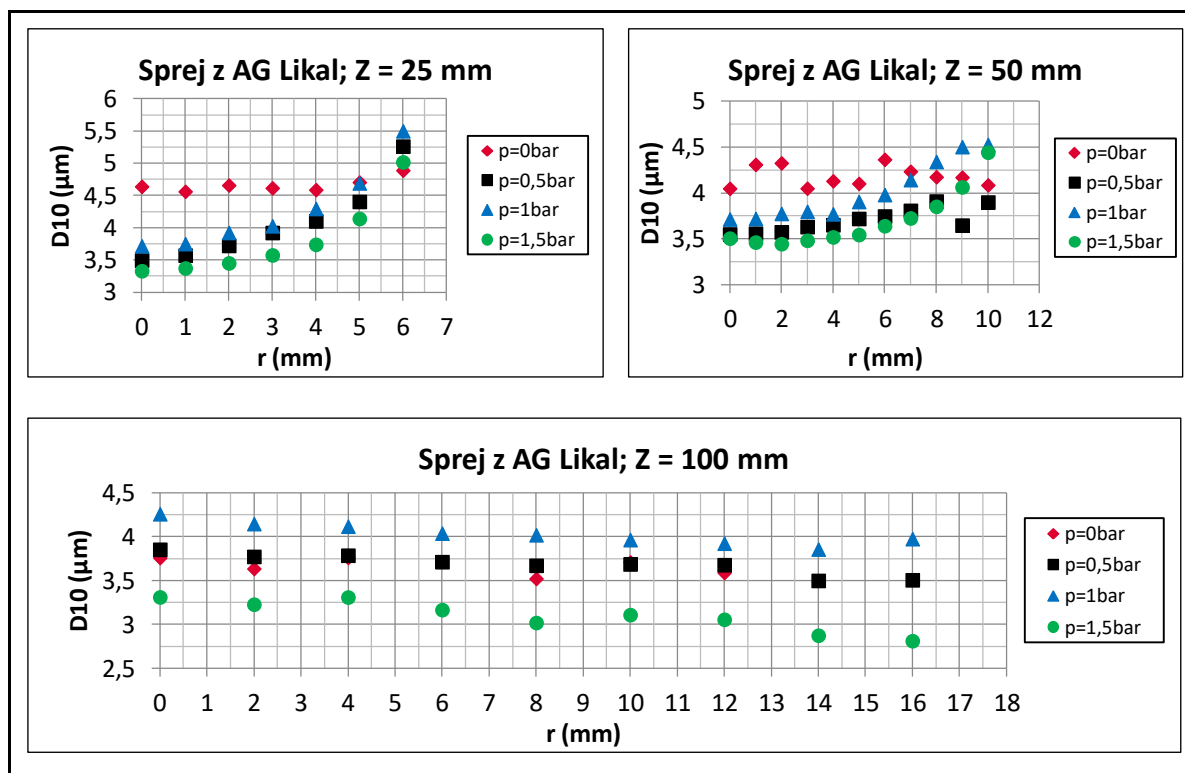
Porovnání predikčního modelu s naměřenými daty pro přetlak hnacího vzduchu 1,5 bar je uvedeno na Obr. 5-5. Průměrný % rozdíl mezi naměřenou a predikovanou hodnotou byl v celém souboru dat okolo 6,8 %. To bylo pro účely práce shledáno jako dostačující, kdy tento model sloužil dále pro predikci teoretického režimu dopadu kapek.



Obr. 5-5 Porovnání predikčního modelu s daty z PDA pro přetlak hnacího proudu vzduchu $p = 1,5 \text{ bar}$

Velikost kapek ve spreji

Dalším analyzovaným parametrem, který byl v rámci PDA měřen, byly distribuce velikostí kapek ve spreji. Díky tomu bylo možné určit, jak se hnací proud vzduchu podílí na rozložení velikosti kapek ve vzniklém spreji. Pro celkové hodnocení jejich velikosti byl vybrán průměr D_{10} , který je v podstatě aritmetickým průměrem (viz 2.3.6). Jeho průběh ve spreji vytvořeném z prostředku AG Likal v závislosti na hnacím tlaku a poloměru spreje je uveden na Obr. 5-6.

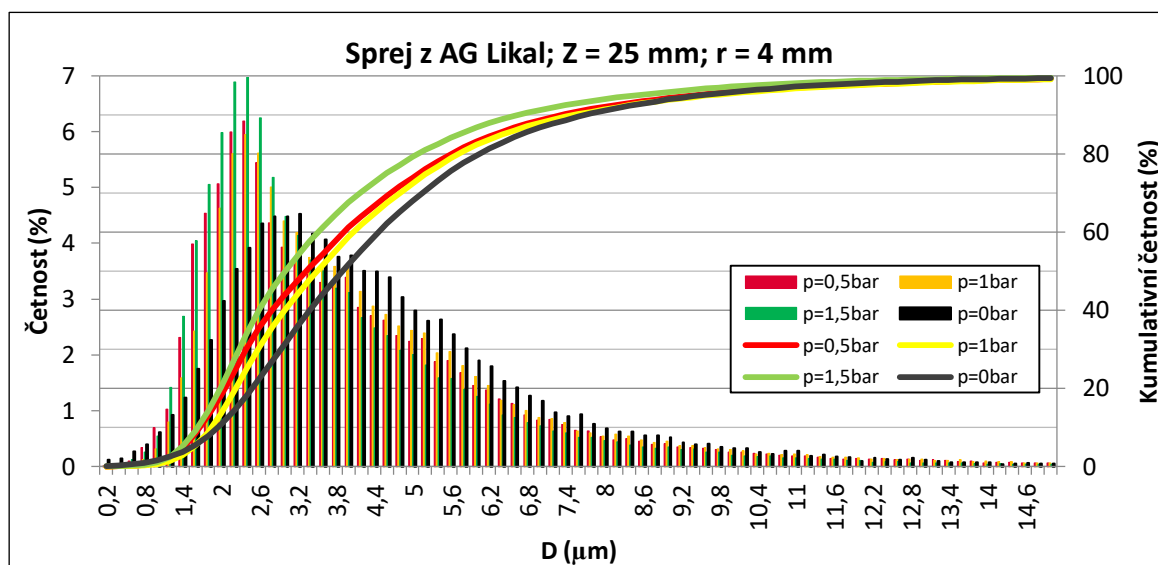


Obr. 5-6 Průběh průměru D_{10} pro spreje vytvořené z ethanolového prostředku AG Likal s různými přetlaky hnacího proudu vzduchu

Z grafů na Obr. 5-6 je možné odečíst, jak se ve spreji vyvíjely velikosti kapek vlivem hnacího proudu vzduchu. V případě, kdy byl centrální proud vypnutý (tj. $p = 0 \text{ bar}$) byla ve všech ústových vzdálenostech průměrná velikost kapek přes poloměr mnohem více rovnoměrná než v případě spuštěného hnacího vzduchu. V případě vyplého centrálního proudu vzduchu bylo také možné spatřit jak se průměr kapek D_{10} s rostoucí vzdáleností snižoval. To naznačovalo odpařování ethanolového prostředku v průběhu letu kapky. Pokud však byl spuštěn i centrální proud vzduchu, klesající trend velikosti kapek v závislosti na ústové vzdálenosti již nebylo možné pozorovat. V tomto případě aritmetický průměr s ústovou vzdáleností fluktoval. Toto kolísání v průměrné velikosti kapek bylo způsobeno i například pohybem kapek ve spreji. Větší kapky měly s nárůstem ústové vzdálenosti větší tendenci setrvávat ve středu spreje, zatímco menší kapky začaly být ve větších vzdálenostech postupně unášeny do jeho okrajů. V blízkých vzdálenostech od ústí (25 a 50 mm) pak bylo možné dokonce spatřit, jak se průměrná velikost kapek mění s poloměrem spreje (viz Obr. 5-6). Takové chování bylo spojeno s dynamikou spreje vlivem spuštěného centrálního proudu vzduchu. V tomto případě se na rozložení velikostí kapek ve spreji mohla podílet tzv. sekundární atomizace. V případě prostředku AG Likal byla průměrná velikost primárně vytvořené kapky okolo $4,5 \mu\text{m}$. Pro takovou kapku by poté dle vztahu z rovnice (14) měla sekundární atomizace v módu „Bag“ vznikat od rychlosti $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a mód „Catastrophic“ od rychlosti cca $57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při porovnání rychlostních profilů bylo možné očekávat těsně u ústí (v oblasti strhávání kapek do proudu vzduchu) rychlosti vyšší, tj. lze předpokládat, že sekundární atomizace hrála v tomto případě

skutečně roli. Ve vzniklém spreji se tedy pohybovaly kapky, které vznikaly fragmentací primárně vytvořené kapky atomizérem. Primárně utvořená kapka aerosolu byla v tomto případě přivedena z oblasti ústí nánosové pistole do proudu hnacího vzduchu, kde byla díky náhlému nárůstu rychlosti rozbita na fragmenty. Větší frakce se pak pohybovala z počátku po okraji spreje, kdy se s jeho dalším vývojem postupně dostávala i do jeho středu.

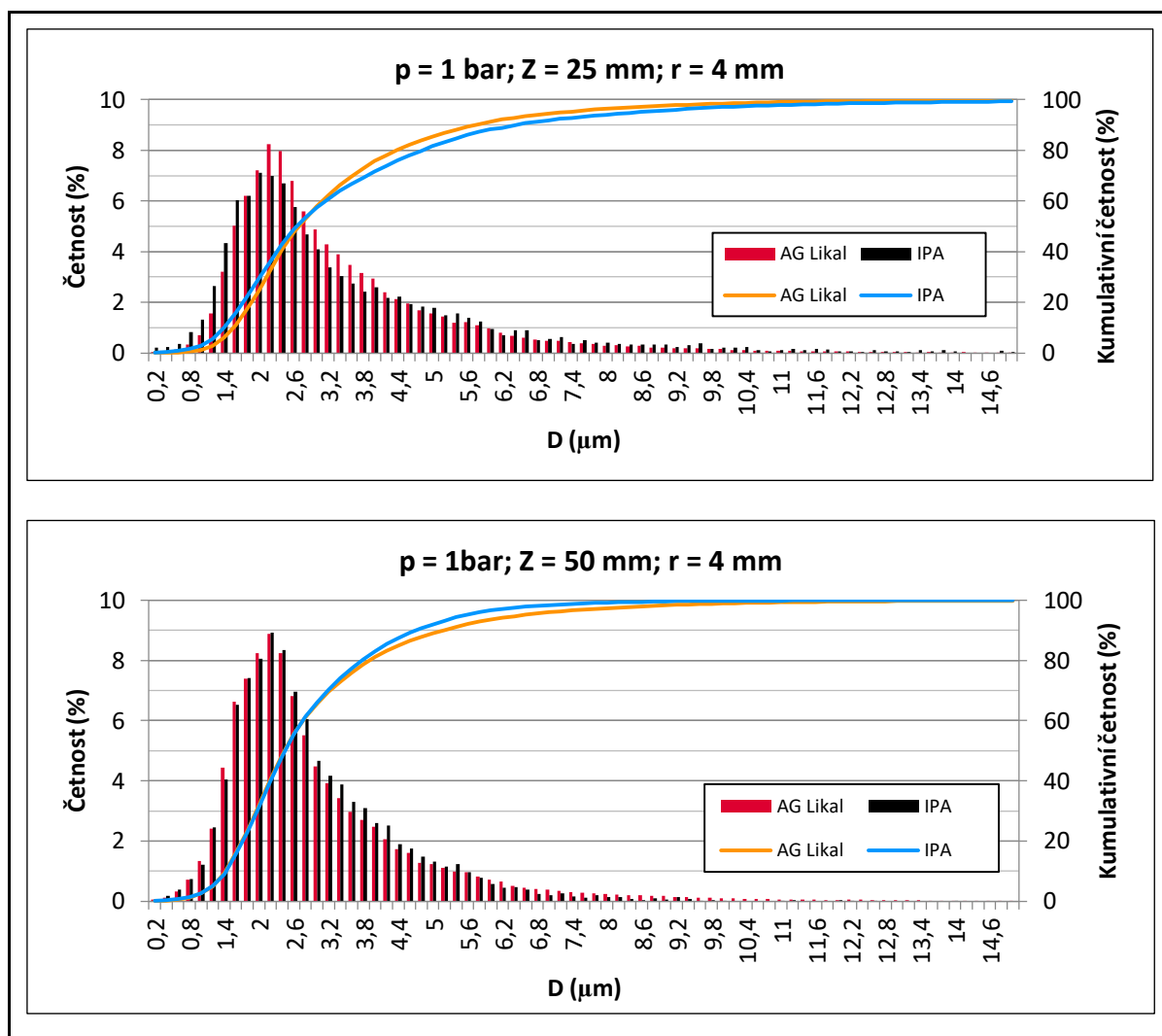
Přítomnost sekundární atomizace potvrzovala i distribuce velikostí kapek ve spreji se spuštěným a vypnutým hnacím proudem vzduchu (viz Obr. 5-7). Bylo patrné, že sprej, který nebyl urychlený hnacím proudem vzduchu obsahoval kapky v mnohem širším spektru, kdy největší četnost kapek byla ve vzdálenosti 25 mm okolo velikosti průměru 3 μm . Spuštění centrálního proudu vzduchu vedlo k posunutí středu distribuce k menším velikostem kapek a k zredukování četnosti velkých kapek. Bylo také možné stanovit, že takovou eliminací větších kapek se vzniklý sprej stal mnohem více homogenní, což se pro aplikaci nástríků zdálo být benefitem. Benefit spočíval v tom, že menší kapky by měly být méně náchylné na režim dopadu „*splash*“ (tj. režim roztržiku) vlivem vyšších energií dopadu. Podobné chování pak lze očekávat i v případě sprejů vytvořených ze suspenzí s TiO_2 .



Obr. 5-7 Distribuční funkce průměrů kapek pro sepnutý a vypnutý hnací proud vzduchu

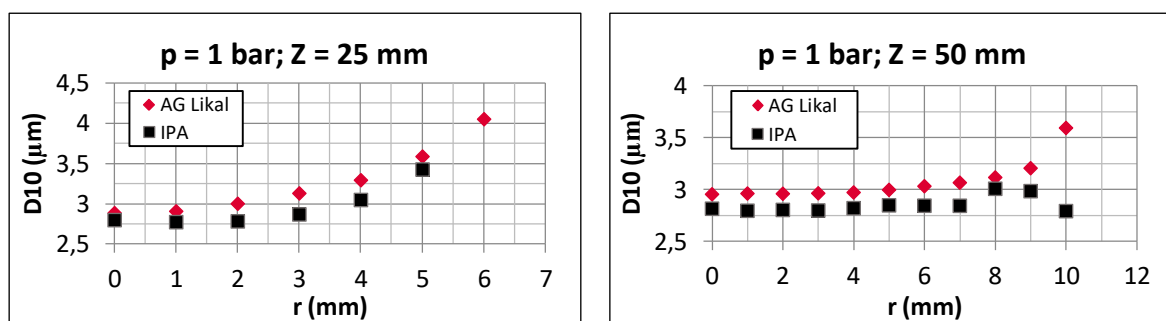
Z histogramů uvedených na Obr. 5-7 je také patrné, že nejčetnější velikost kapek byla pro všechny uvažované přetlaky hnacího vzduchu v rozmezí cca 2 až 2,6 μm . Z toho bylo možné usoudit, že vytvořený sprej se ve všech případech choval poměrně konzistentně.

V případě porovnání sprejů vytvořených z isopropylalkoholu a ethanolového prostředku AG Likal bylo možné stanovit, že sprej z IPA obsahoval výrazně nižší počet kapek. O tomto fenoménu bylo pojednáno v navazující kapitole, která se zabývala tokem (*Data Rate*) kapek ve spreji. Obecně však i zde platilo, že distribuce velikostí kapek se v obou případech zásadně nelišila. I zde byly středy distribuce velikostí kapek okolo hodnoty $2\ \mu\text{m}$, a to jak pro sprej vytvořený z IPA, tak pro sprej z prostředku AG Likal (viz Obr. 5-8). Distribuce velikostí kapek poté i zde odpovídala nesymetrickému rozdělení, které bylo ovlivněno sekundární atomizací.



Obr. 5-8 Distribuční funkce průměrů kapek pro spreje vytvořené z IPA a AG Likal

Pro možnost porovnání obou sprejů z globálního pohledu jsou na Obr. 5-9 uvedeny distribuce průměrů kapek D_{10} ve spreji z látek IPA a AG Likal. Z uvedených grafů je patrné, že průměr D_{10} byl u isopropylalkoholového spreje mírně menší, nicméně rozdíl byl maximálně v řádech jednotek stovek nanometrů. Z toho bylo patrné, že odlišné fyzikální vlastnosti obou látek neměly na velikost kapek v podstatě žádný vliv. Na základě tohoto faktu bylo možné usoudit, že i sprej generovaný z různých suspenzí bude obsahovat víceméně stejné velikosti kapek jako v případě spreje vytvořeného z čisté nosné kapaliny.



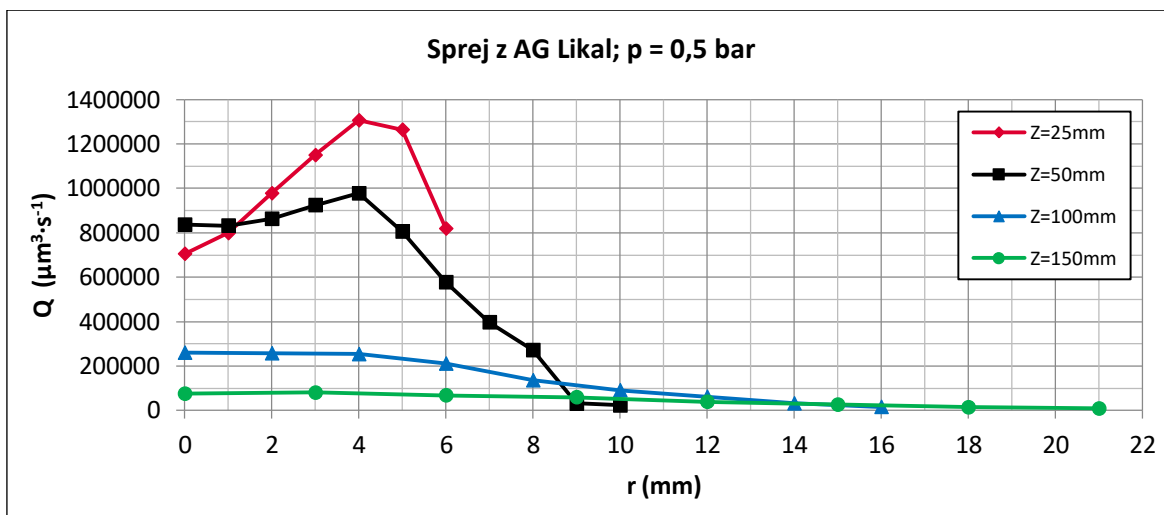
Obr. 5-9 Průběh průměru D_{10} pro sprej z ethanolového prostředku AG Likal a IPA

Průtok kapek ve spreji

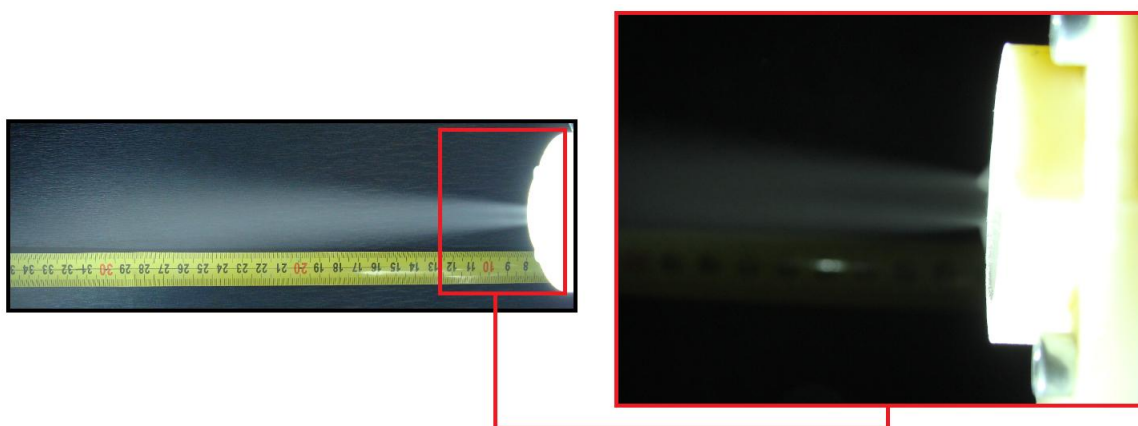
Z výsledků měření na PDA bylo také patrné, že centrální proud vzduchu nedefinuje pouze tvar spreje, ale také rozložení objemového průtoku kapek v něm obsažených.

Na Obr. 5-10 je znázorněna závislost objemového průtoku kapek v jednotlivých místech měření pro přetlak vzduchu 0,5 bar a různé ústové vzdálenosti. Pro výpočet tohoto objemového průtoku bylo využito průměru D_{30} (viz kapitola 2.3.6). Z těchto výsledků bylo patrné, že největší objemový průtok byl situován v blízkých ústových vzdálenostech a že rapidně klesá s jejím nárůstem. Zde se potvrdilo také to, že ve vzdálenosti $Z = 25 \text{ mm}$ byl větší objem kapaliny situován na okraji spreje ($r = 4\text{--}5 \text{ mm}$). S nárůstem vzdálenosti se jeho rozložení napříč poloměrem spreje postupně zrovnoměřňovalo. Toto chování bylo možné ve spreji pozorovat i vizuálně při provozu (viz Obr. 5-11). Z detailu fotografie spreje v blízkosti ústí je evidentní, že střed spreje z počátku přenášel menší objem kapek. Tento fenomén byl definován napojením kapek z oblasti ústí nánosové pistole do hnacího proudu vzduchu. Z rozložení objemového průtoku spreje v blízkých ústových vzdálenostech bylo také patrné, jak tok rapidně klesal s nárůstem poloměru spreje. V tomto případě byl úhel spreje, který pokrýval $\approx 90\%$ jeho objemu roven přibližně $13,5^\circ$.

Podobné chování poté bylo patrné i u sprejů vytvořených ze suspenzí s titanovou bělobou.

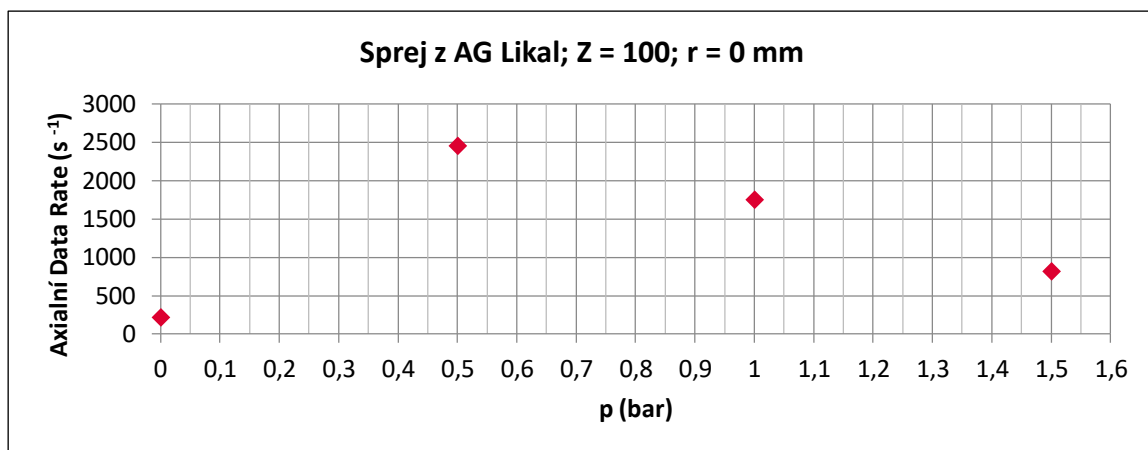


Obr. 5-10 Průběh objemového průtoku spreje z ethanolového prostředku AG Likal v závislosti na poloměru spreje r a ústové vzdálenosti Z



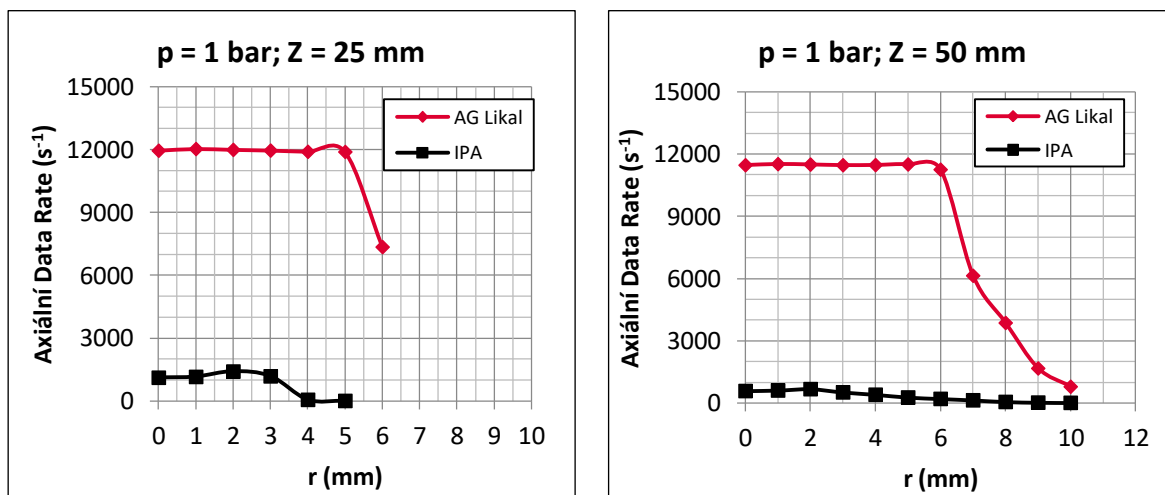
Obr. 5-11 Fotografie spreje s detailem spreje v blízké ústové vzdálenosti (atomizovaná látka - suspenze *Kronos 2066* + AG Likal (1:4), použitý přetlak vzduchu $p = 0,5$ bar)

Na Obr. 5-12 je uvedena závislost axiálního toku kapek za 1 sekundu (tzv. *Data Rate*) na přetlaku hnacího vzduchu pro spreje generované z látky AG Likal. Uvedený graf odpovídá měření v ose spreje v ústové vzdálenosti 100 mm. Z tohoto grafu je evidentní, že přetlak 0,5 bar generoval sprej, který měl nejvyšší *Data Rate*. To naznačovalo tomu, že se jedná o oblast vhodného nastavení přetlaku vzduchu pro tvorbu nástřiků.



Obr. 5-12 Závislost axiálního Data Ratu kapek na přetlaku hnacího vzduchu pro sprej vytvořený z látky AG Likal

Porovnání axiálního *Data Ratu* sprejů z látek IPA a AG Likal je uvedeno na grafech na Obr. 5-13. Z uvedených výsledků je možné stanovit závěr, že sprej vytvořený z ethanolového prostředku AG Likal obsahoval výrazně více kapek než ten z isopropylalkoholu. Redukce počtu kapek ve spreji byla přisuzována odlišným fyzikálním vlastnostem látek, především pak dynamické viskozitě, která byla v případě IPA vyšší. To potvrzovaly i výsledky v práci Ghazanfari [33], kde bylo uvedeno, že vyšší viskozita se u membránových atomizérů může projevit redukcí množství vyprodukovaných kapek.



Obr. 5-13 Průběhy axiálního *Data Ratu* kapek pro spreje vytvořené látkami AG Likal a IPA

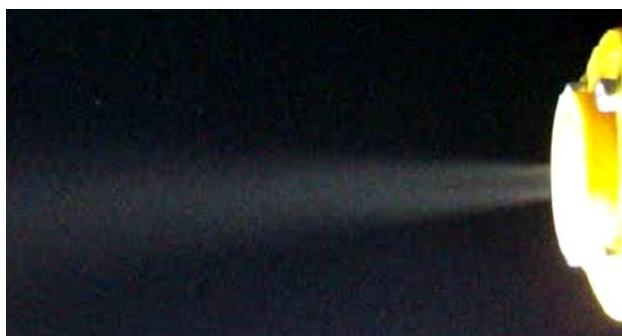
5.4.2 Analýza ústí

Z dosažených výsledků bylo možné určit, že makroskopický tvar spreje definovala především tryska ofukovací pistole a ústí nánosové pistole se podílelo pouze na strhávání aerosolu do hnacího proudu vzduchu. Z reálného provozu pistole s válcovým ústím se ukázalo, že se v oblasti strhávání atomizované suspenze do proudu vzduchu objevovala nestabilní struktura proudění, která se odrážela v chování spreje. Množství kapek ve spreji v těchto případech vizuálně fluktuovalo okolo osy spreje. Pro větší názornost je tento fenomén uveden na Obr. 5-14. Tato struktura se pak objevila i v CFD analýze. Konkrétně se jednalo o napojení proudění z dutiny pistole do centrálního proudu vzduchu (viz detail na Obr. 5-16a). V reálné aplikaci tento proud definoval samotné strhávání kapek.



Obr. 5-14 Nestabilita na konci válcového ústí pistole při strhávání atomizované suspenze do hnacího proudu vzduchu s přetlakem 0,3 bar

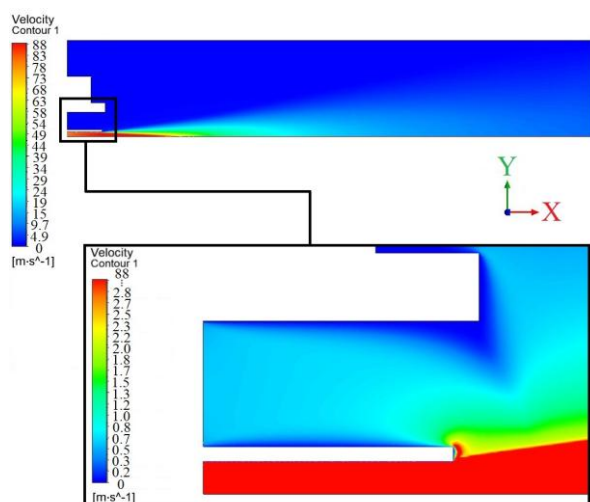
Ústí, které toto chování eliminovalo, bylo ostré konvergentní ústí. V tomto případě byla tato oblast výrazně potlačena (viz Obr. 5-16b). To potvrzoval i snímek spuštěného spreje s přetlakem hnacího proudu vzduchu 0,3 bar (viz Obr. 5-15), kdy sprej s tímto ústím působil mnohem stabilněji. Z tohoto důvodu byly do další analýzy zařazeny také nástřiky vytvořené s tímto tvarem ústí.



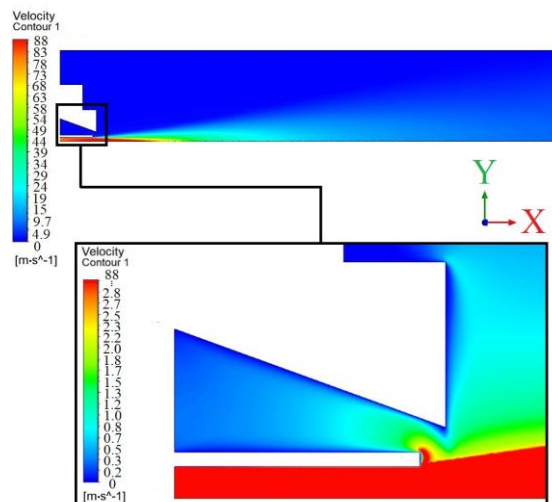
Obr. 5-15 Sprej vytvořený pistolí s ostrým konvergentním ústím s přetlakem hnacího vzduchu 0,3 bar

Mírné konvergentní ani divergentní ústí nebyly do dalších analýzy zařazeny právě kvůli přetrvávajícímu výskytu výše zmíněné oblasti proudění. Byla provedena také simulace s prodlouženým válcovým ústím. V tomto případě se však uvnitř dutiny vytvářel cirkulující vír. Byl stanoven předpoklad, že by tato struktura mohla podněcovat vyšší nestabilitu samotného spreje a ani toto ústí tedy nebylo dále uvažováno.

a) Válcové ústí (VÚ)



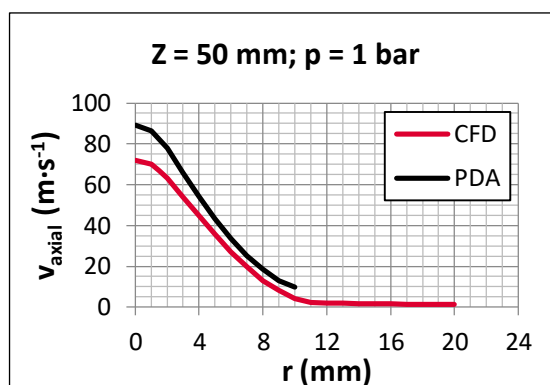
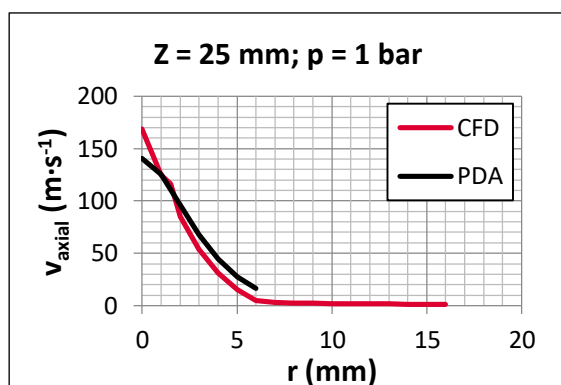
b) Ostré konvergentní ústí (OKÚ)



Obr. 5-16 CFD analýza ústí nástřikové pistole pro přetlak hnacího proudu vzduchu 0,3 bar.

a) Válcové ústí (VÚ), b) Ostré konvergentní ústí (OKÚ)

Na Obr. 5-17 je uvedeno srovnání CFD simulace s měřením rychlostí kapek na PDA, zda uvažovaná zjednodušení nevedla k nesmyslným výsledkům. Zde byl uveden příklad porovnání dat provedených na rychlostních profilech ve vzdálenostech 25 a 50 mm pro přetlak hnacího vzduchu 1 bar.

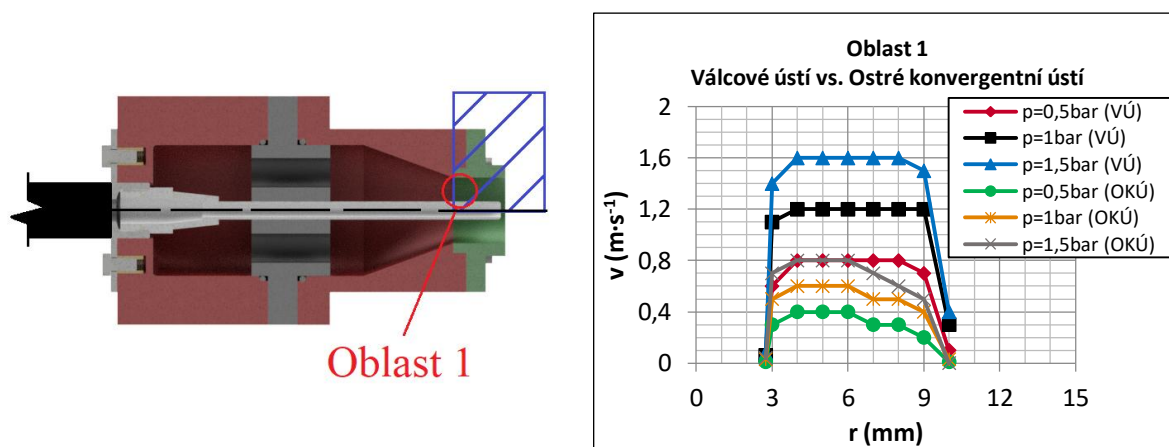


Obr. 5-17 Porovnání výsledků z CFD analýzy a měření rychlostí kapek na PDA

Bylo patrné, že použitá zjednodušení modelu vedla k odchylkám rychlostí především v ose proudění. Lze předpokládat, že v případě profilu získaného z PDA svoji roli mohla hrát například hybnost kapiček. I přesto simulace umožnila v celku přesně vykreslit rychlostní profil a vývoj proudění. Simulace pak také umožnila předpovídat, jaké přibližné rychlostní pole vzniká v ústí nánosové pistole, díky čemuž jsou kapky strhávány do centrálního proudu vzduchu.

Z měření spreje na PDA bylo u pistole s válcovým ústím patrné, že z přetlaků 0,5; 1 a 1,5 bar bylo nejvyššího *Data Ratu* kapek dosahováno v případě přetlaku 0,5 bar

(viz Obr. 5-12). Pokud byl hnací proud vzduchu vypnutý, kapky z ústí pistole vystupovaly s rychlostmi do $\approx 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což definovalo objemový průtok kapek vystupujících z pistole. Zde byla stanovena hypotéza, že pro efektivní strhávání kapek do centrálního proudu vzduchu je potřeba, aby v *Oblasti 1* (viz Obr. 5-18 vlevo) byl objemový průtok vzduchu podobný, aby se vyrovnalo množství odvodu a přívodu kapek. Bylo tedy uvažováno, že by v *Oblasti 1* mělo být dosahováno rychlostního pole o velikosti přibližně $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z této úvahy vyplývalo, že z výsledků měření na PDA byl přetlak 0,5 bar z uvažovaných přetlaků nejvhodnější, jelikož se nejvíce přibližoval hodnotě $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na základě této hypotézy se poté zdálo být vhodnější použití ostrého konvergentního ústí, které by v *Oblasti 1* mělo v případě přetlaku 0,5 bar generovat rychlostní pole vzduchu se střední rychlostí přibližně $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 5-18 Rychlost proudění vzduchu v ústí nánosové pistole – výsledky CFD analýzy

5.4.3 Predikce režimu dopadu kapek

Pro odhad režimu dopadu kapek byly pro stanovení hraničních hodnot Weberova čísla použity predikční modely uvedené v kapitole 2.3.3.

Pro definici hranice režimu dopadu mezi „Stick“ → „Rebound“ (tj. mezi ulpěním a odrazem) bylo užito kritéria z rovnice (7). Pro přechodné kritérium mezi režimy „Rebound“ → „Spread“ (tj. mezi odrazem a depozicí) bylo užito rovnice (8). Pro odhad hranice mezi režimem „Spread“ → „Splash“ (tj. hranice mezi režimy depozice a rozstříku) bylo užito predikčního vztahu dle rovnice (6), který zahrnuje i drsnost zmatňovaného substrátu. Druhý predikční model, který byl pro odhad hranice mezi depozicí a rozstříkem použit, vycházel z rovnice (12).

Jako příklad predikce dopadu kapek zde byla uvedena tabulka (viz Tab. 5-4) pro suspenzi *Kronos 2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4. Hodnoty zveřejněné v této tabulce uvádějí, při jakém poloměru spreje by mělo docházet k danému režimu dopadu kapky. Velikost průměru kapky pro predikci byla zvolena jako 2 a 3,5 μm , jakožto nejčtenější

velikost kapek a jejich přibližná průměrná hodnota. Drsnost povrchu substrátu byla uvažována jako 1 nm (viz Tab. 4-10). Políčko, které v tabulce obsahovalo pomlčku, poukazovalo na to, že při daných podmínkách by nemělo docházet k danému režimu dopadu kapek. Hodnoty ve sloupci „*Spread*“ poté byly odvozeny z hodnot rozsahů poloměrů spreje z vedlejších sloupců. Jako poloměry spreje byly v jednotlivých úst'ových vzdálenostech uvažovány ty, uvedené v Tab. 4-6. Tyto poloměry měly vždy pokrýt $\approx 90\%$ objemového průtoku spreje. Pro úst'ovou vzdálenost 75 mm byla maximální hodnota poloměru odhadnuta z vývoje spreje přibližně na 13 mm. Tuto predikční tabulku je však nutné chápat spíše informativně, jelikož proces dopadu spreje na substrát je velmi komplexním problémem. I přesto však umožnila alespoň rámcově ukázat, jaké režimy lze při jednotlivých nastaveních systému očekávat. Je také nutno podotknout, že predikční tabulka neuvažuje laterální posuv spreje.

Tab. 5-4 Predikce režimu dopadu kapky ze suspenze *Kronos 2066 + AG Likal (1:4)*

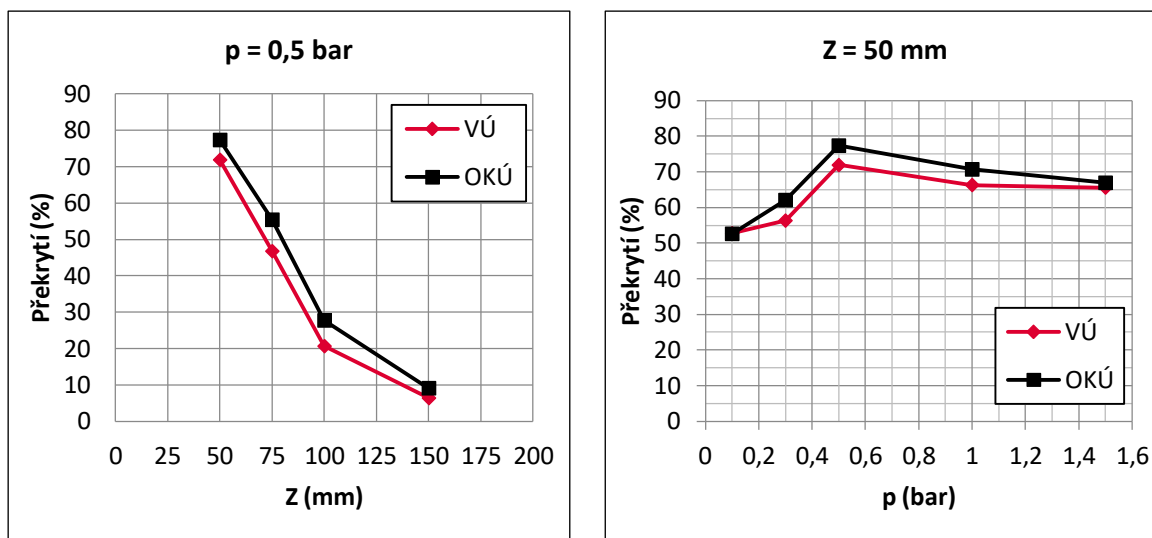
Kronos 2066 + AG Likal (1:4); Ra = 1 nm										
Úst'ová vzdálenost a celkový poloměr spreje	Přetlak <i>p</i> (bar)	Výskyt při poloměru spreje <i>r</i> (mm) pro průměry kapek D = 2 a 3,5 μm								
		„Stick“		„Rebound“		„Splash“		„Splash“		„Spread“
		dle rovnice (7)	dle rovnice (8)	dle rovnice (12)	dle rovnice (6)					
		2 μm	3,5 μm	2 μm	3,5 μm	2 μm	3,5 μm	2 μm	3,5 μm	
Z=50mm r(0;10) mm	0,1	7-10	8-10	5-6	7	-	-	-	-	0-4
	0,3	9-10	10	8	9	-	-	-	-	0-7
	0,5	10	-	9	10	-	0-1	-	-	2-8
	1	-	-	10	-	0-2	0-4	-	0-2	5-9
	1,5	-	-	-	-	0-3	0-5	0-2	0-3	6-10
Z=75mm r(0;13) mm	0,1	8-13	10-13	5-7	7-9	-	-	-	-	0-4
	0,3	12-13	13	10-11	11-12	-	-	-	-	0-9
	0,5	13	-	11-12	13	-	-	-	-	0-10
	1	-	-	13	-	-	0-3	-	-	4-12
	1,5	-	-	-	-	0-1	0-5	-	0-1	6-13
Z=100mm r(0;16) mm	0,1	8-16	11-16	2-7	7-10	-	-	-	-	0-1
	0,3	14-16	15-16	11-13	13-14	-	-	-	-	0-10
	0,5	16	-	13-15	15-16	-	-	-	-	0-12
	1	-	-	16	-	-	-	-	-	0-15
	1,5	-	-	-	-	-	0-4	-	-	5-16
Z=150mm r(0;21) mm	0,1	3-21	10-21	0-2	0-9	-	-	-	-	-
	0,3	16-21	19-21	11-15	15-18	-	-	-	-	0-10
	0,5	20-21	-	16-19	19-21	-	-	-	-	0-15
	1	-	-	20-21	-	-	-	-	-	0-19
	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	0-21

5.5 Analýza nástřiků – vliv procesních parametrů

V této kapitole bylo shrnuto, jak se nastavení procesních parametrů nanosové pistole projevovalo na zmatňujících nástřicích. Popis materiálů a metod použitých v rámci této analýzy byl uveden v kapitole 4.5.

5.5.1 Překrytí povrchu

V této části práce bylo analyzováno, jak se jednotlivé procesní parametry pistole projeví na překrytí referenčního objektu nástřikem. Výsledky z této analýzy jsou uvedeny na Obr. 5-19. Z uvedených grafů je patrné, že na překrytí povrchu nástřikem má úst'ová vzdálenost Z a použitý přetlak hnacího vzduchu p zásadní vliv. V rámci této analýzy bylo cílem nalézt procesní parametry, které budou schopny po 1 nástřiku deponovat co nejrovnoměrnější vrstvu, s co možná nejlepším překrytím. Tomuto kritériu nejlépe odpovídala úst'ová vzdálenost 50 mm. V této vzdálenosti bylo po 1 přejezdu spreje dosahováno nejvyššího a nejrovnoměrnějšího překrytí. Toto tvrzení podporovaly i výsledky získané v rámci měření na PDA a vizuální podoba spreje. Vytvořený sprej byl v této vzdálenosti stabilní a obsahoval vysoký průtok kapek, který byl ve středu spreje již poměrně rovnoměrně rozložený (viz Obr. 5-10). Z Obr. 5-19 *vlevo* je patrné, že s nárůstem úst'ové vzdálenosti docházelo k téměř exponenciálnímu poklesu překrytí povrchu po 1 přejezdu spreje. Tento fakt byl dán vývojem spreje v prostoru, kdy se tok kapek se vzdáleností výrazně snižoval. Z hlediska velikosti přetlaku hnacího proudu vzduchu se jako vhodný jevil přetlak $p = 0,5 \text{ bar}$ (viz Obr. 5-19 *vpravo*). Tento závěr byl podpořen i výsledky závislosti axiálního *Data Ratu* na použitém přetlaku vzduchu, které byly získány v rámci měření na PDA (viz Obr. 5-12). Vhodnost tohoto přetlaku pak byla podpořena i výsledky z predikce režimu dopadu kapek (viz Tab. 5-4), kdy by při tomto nastavení měl být stále ještě dominantní požadovaný režim „*spread*“ (tj. režim depozice kapek). Díky tomuto nastavení bylo možné dosáhnout po 1 přejezdu spreje překrytí přesahující 70 %. Nižší hodnoty přetlaku vzduchu vedly k méně stabilnímu spreji s nižší energií kapek, což se pravděpodobně negativně odráželo i v překrytí destičky nástřikem. Naopak vysoké přetlaky také vedly k mírnému poklesu překrytí destičky povlakem. Zde se mohla projevovat například vysoká energie kapek, která by dle Tab. 5-4 měla teoreticky vést již k dominanci režimu rozstřiku kapky po jejím dopadu na povrch. Stejně tak se zde mohl projevit i předpokládaný nižší tok kapek v jednotlivých místech spreje (viz Obr. 5-12).

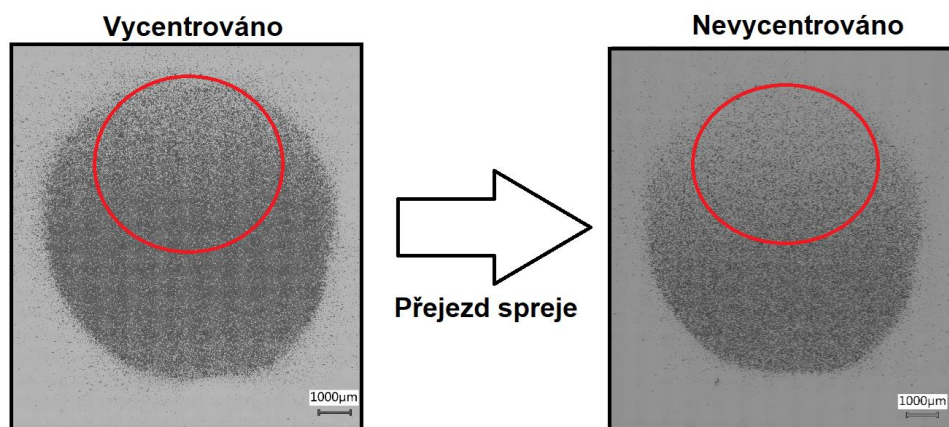


Obr. 5-19 Průměrné procentuální překrytí povrchu nástřikem po 1 přejezdu spreje, vytvořeného pistolí s válcovým (VÚ) a ostrým konvergentním ústím (OKÚ). Závislost průměrného překrytí na ústové vzdálenosti spreje (vlevo), závislost průměrného překrytí na velikosti přetlaku hnacího vzduchu (vpravo)

Na základě těchto výsledků bylo možné porovnat také účinek různých koncovek ústí nánosové pistole. Zde se ukázalo, že ústí nemá na podobu nástřiku zásadní vliv. Podoba i charakter spreje byly definované především tryskou ofukovací pistole. Získané výsledky se pro oba typy ústí výrazně nelišily. Hlavní výhodou ostrého konvergentního ústí však byla lepší stabilita spreje (sprej vizuálně méně fluktoval okolo své osy) a zřejmě i lepší efektivita strhávání kapek do centrálního proudu vzduchu, což se obecně projevovalo mírně vyšším % překrytím povrchu nástřikem. Z tohoto důvodu byl pro další analýzy zabývající se vlivem suspenzí a zmatňováním reálných součástí použit právě tento typ koncovky nástřikové pistole.

V souvislosti s překrytím povrchu nástřikem je nutné počítat také s rozložením objemu spreje napříč jeho poloměrem (viz Obr. 5-10), a to především v bližších ústových vzdálenostech. Stejně tak je nutné počítat s podélným pohybem spreje. Obecně platilo, že oblast nástřiku vytvořená ze středu spreje byla hustěji osídlena než ta část, která vznikla z jeho okraje. To je patrné na Obr. 5-20, kde byly uvedeny snímky nástřiků vzniklé při přetlaku vzduchu 0,5 bar v ústové vzdálenosti 50 mm. Tmavé oblasti na Obr. 5-20 odpovídají zmatňujícímu nástřiku. Tyto nástřiky byly provedeny s vycentrovanou a nevycentrovanou osou spreje vůči středu destičky. U snímku vpravo (tj. nevycentrovaný sprej) byla osa spreje mírně pod středem destičky. V případě ústové vzdálenosti 50 mm byl celkový poloměr spreje okolo 10 mm, zatímco jeho efektivní velikost byla při poloměru přibližně 4 mm. Nástřik z oblasti většího poloměru spreje byl řidší, což se negativně projevovalo i v naskenovaných datech. Naskenovaná plocha v těchto místech byla zredukována a standardní odchylka bodů od proložené roviny se zvýšila.

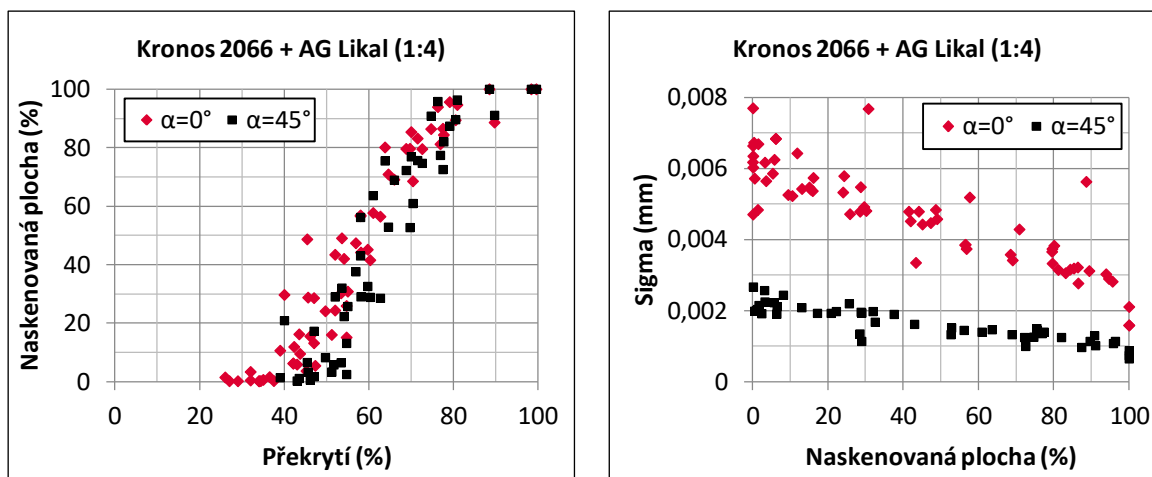
Tento fakt musí být brán v potaz při plánování překryvů jednotlivých přejezdů spreje při reálném provozu.



Obr. 5-20 Nástřik provedený při nastavení: $p = 0,5 \text{ bar}$; $Z = 50 \text{ mm}$; 1 vrstva, průměr překryté oblasti $\approx 9 \text{ mm}$.
Vycentrovaný sprej (vlevo), nevycentrovaný sprej (vpravo)

5.5.2 3D skenování

Výsledky 3D skenování ukázaly silnou korelaci mezi překrytím povrchu a velikostí zachycené plochy skenerem. To je patrné ze získaných výsledků uvedených na Obr. 5-21 *vlevo*. Odtud bylo možné stanovit, že pro zachycení alespoň nějaké plochy křemíkové destičky bylo potřeba $\approx 40\%$ překrytí povrchu zmatňujícím nástřikem. S nárůstem % překrytí destičky povlakem se poté lineárně zvyšovalo i množství naskenované plochy, zatímco se směrodatná odchylka (*Sigma*) získaného mračka bodů vůči proložené referenční rovině postupně snižovala (viz Obr. 5-21 *vpravo*). Redukce rozptylu nasnímaných bodů vůči referenční rovině byla způsobena eliminací chybových odrazů skenerem emitovaného světla povlakem. Takové chování bylo očekáváno. Bylo také zřejmé, že skenování pod úhlem 0° (tj. bez náklonu destičky) dosahovalo vyšších hodnot *Sigma*. To poukazovalo na to, že odraz světla na nenakloněné destičce byl pro kamery skeneru méně příznivý nežli v případě jejího odklonu o 45° . Ze získaných skenů bylo také možné definovat hranici % překrytí křemíkové destičky povlakem, aby byla zachycena celá plocha. V tomto případě musí překrytí dosahovat $\approx 85\%$. Při porovnání dat z předchozí kapitoly (tj. analýza *Překrytí povrchu*) lze očekávat, že pro naskenování celé plochy s poměrně dobrou přesností, je potřeba přibližně 2 přejezdů spreje. Je však nutno poznamenat, že toto platí pro suspenzi *Kronos 2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4 a pro zrcadlově lesklý povrch.



Obr. 5-21 Výsledky 3D skenování. Závislost naskenované plochy na překrytí povrchu nástřikem (vlevo), Závislost směrodatné odchylky zachyceného mračna bodů vůči referenční rovině na naskenované ploše (vpravo)

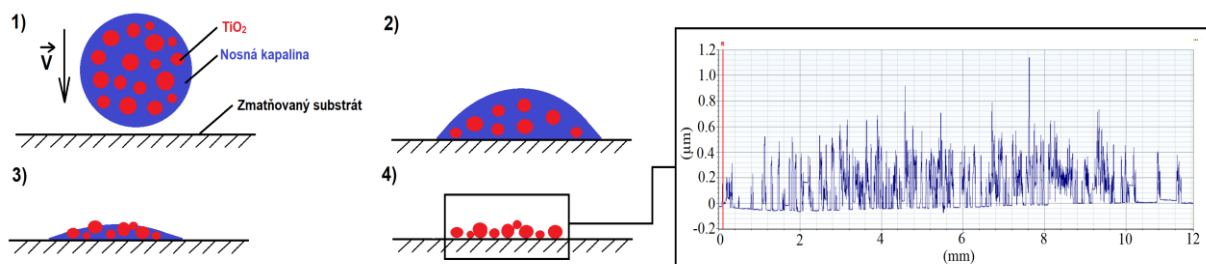
5.5.3 Tloušťka nanesené vrstvy

Z výsledků měření tloušťky povlaků bylo možné stanovit, že pro 1 přejezd spreje byla průměrná výška profilu R_c pro všechny procesní parametry v rozmezí ≈ 200 až 600 nm. Bylo také možné pozorovat, že v případě nástřiků provedených v bližších úst'ových vzdálenostech se velikost R_c dostávala k horní hranici zmíněného rozsahu tloušťek. To bylo spjato s tokem kapek ve spreji. Dle výsledku z PDA byl blíže ústí vyšší tok kapek jednotlivými místy (viz Obr. 5-10), což značilo vyšší pravděpodobnost dopadu více kapiček na sebe. To poté mohlo vyústit v to, že na sobě ulpělo více zrn titanové běloby, čímž se zvýšila i průměrná výška výstupku profilu.

V tomto případě byly nástřiky provedeny ze suspenze s titanovou bělobou Kronos 2066. Tento prášek by měl mít dle výrobce mediánovou velikost primárních částic okolo 340 nm. To v podstatě potvrdilo i měření velikosti částic v suspenzi (viz Obr. 5-1). Zde se však ukázalo, že distribuce velikosti se pohybovala od přibližně 140 až po $1\,300$ nm. Nicméně to úzce korespondovalo s naměřenými daty, jelikož byl rozsah výstupků profilu velmi blízký velikostem částic samotného prášku Kronos. Z toho bylo možné stanovit závěr, že tloušťka vrstvy je primárně definována velikostí částic pigmentu.

Z výsledků bylo také patrné, že přetlak neměl přímo na tloušťku nástřiku v podstatě žádný vliv. Tlak stejně jako tvar ústí v tomto případě mohl tloušťku ovlivňovat spíše nepřímou, a tedy že ovlivňovaly pouze charakter spreje. Samotná tloušťka byla definována především velikostí pigmentu a pravděpodobností dopadu více kapek přes sebe. Tento závěr podporoval i teoretický princip vzniku nástřiku. Prášek byl součástí kapky, jejíž základ byl tvořen nosnou kapalinou. Při uvážení ideálních podmínek dopadu jedné kapky na substrát by měl nástřik vznikat přibližně tak, jak je uvedeno na Obr. 5-22. V prvním až třetím kroku

byl znázorněn dopad jedné kapky na zmatňovaný substrát, který byl doprovázen postupným odpařováním nosné kapaliny. V posledním kroku docházelo k jejímu úplnému odpaření a na povrchu zůstal už jen pigment tvořící nástržik.



Obr. 5-22 Teoretický princip tvorby nástržiku

Pro větší názornost jsou na Obr. 5-22 uvedena i surová data z měření profilu nástržiku vytvořeného ve vzdálenosti 100 mm při použití přetlaku hnacího proudu vzduchu 1 bar. Na svislé ose je uvedena výška výstupku profilu, zatímco na podélné ose je znázorněna délka proměřované oblasti nástržiku.

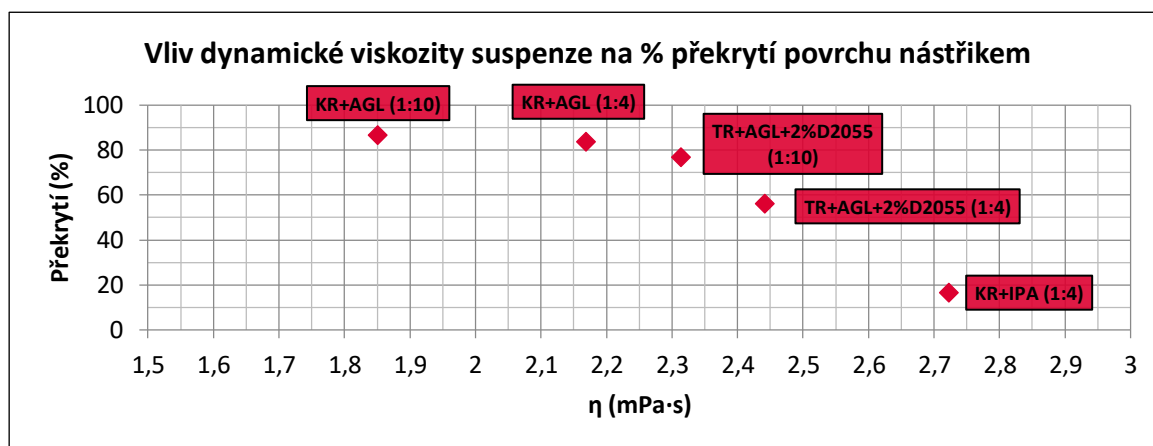
5.6 Analýza nástržků – vliv suspenzí

V této kapitole bylo shrnuto, jak se různé typy titanové běloby, jejich různá koncentrace v nosné kapalině a počet přejezdů spreje (tj. počet vrstev) přes křemíkovou destičku projeví na výsledných nástržcích, jejich tloušťce a získaných 3D skenech. Popis materiálů a metod použitých v této analýze byl uveden v kapitole 4.6. V tomto případě byla pro analýzu % překrytí povrchu a výsledků 3D skenování vybrána oblast uprostřed destičky o rozměrech 4×4 mm. Zmenšení analyzovaného rozměru oproti předchozí analýze bylo podloženo následující úvahou. V reálné aplikaci nástržků je předpokládáno, že se jednotlivé nástržiky budou překrývat tak, aby byla eliminována méně zmatněná oblast na okraji nástržiku (viz Obr. 5-20). Redukce kontrolní oblasti tedy byla provedena za účelem odstranit vliv nástržiku z okraje spreje.

5.6.1 Překrytí povrchu

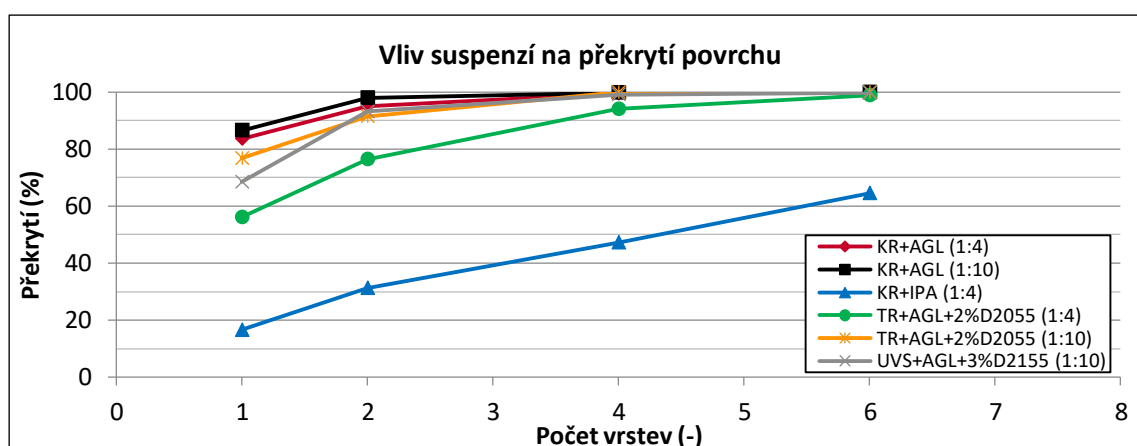
Díky analýze překrytí povrchu bylo možné definovat, jak se mohou různé fyzikální vlastnosti jednotlivých suspenzí podílet na % překrytí referenční křemíkové destičky povlakem. Lze očekávat, že překrytí povrchu po 1 přejezdu spreje úzce souviselo s množstvím kapek v něm obsažených. Tj. čím je vyšší tok kapek ve spreji, tím větší překrytí lze po 1 přejezdu spreje očekávat. V tomto případě byly suspenze chápány jako celek, který tvořil jednotnou kapalinu s konkrétními fyzikálními vlastnostmi uvedenými v Tab. 5-3. Po bližší analýze těchto charakteristik a výsledků % překrytí povrchu

po 1 přejezdu spreje (tj. 1 vrstva) bylo patrné, že na rozsah překrytí destičky, a tedy i na množství kapek ve spreji má pravděpodobně podstatný vliv dynamická viskozita suspenzí. Výsledky této analýzy, a tedy pokles % překrytí povrchu nástřikem vlivem nárůstu dynamické viskozity suspenzí, jsou uvedeny na grafu na Obr. 5-23. Tento závěr úzce korespondoval s výsledky z práce Ghazanfari [33], kde bylo uvedeno, že nárůst viskozity látky vedl u membránových atomizérů k redukci množství vygenerovaného aerosolu. Zde je nutné poznamenat, že suspenze s práškem UVS30 byly z analýzy uvedené na Obr. 5-23 vyřazeny. Bylo to z důvodu výskytu kašovitého sedimentu, který způsobovala výrazné smykově řídnuocí chování.



Obr. 5-23 Vliv dynamické viskozity suspenze na % překrytí povrchu destičky pro 1 vrstvou nástřiku

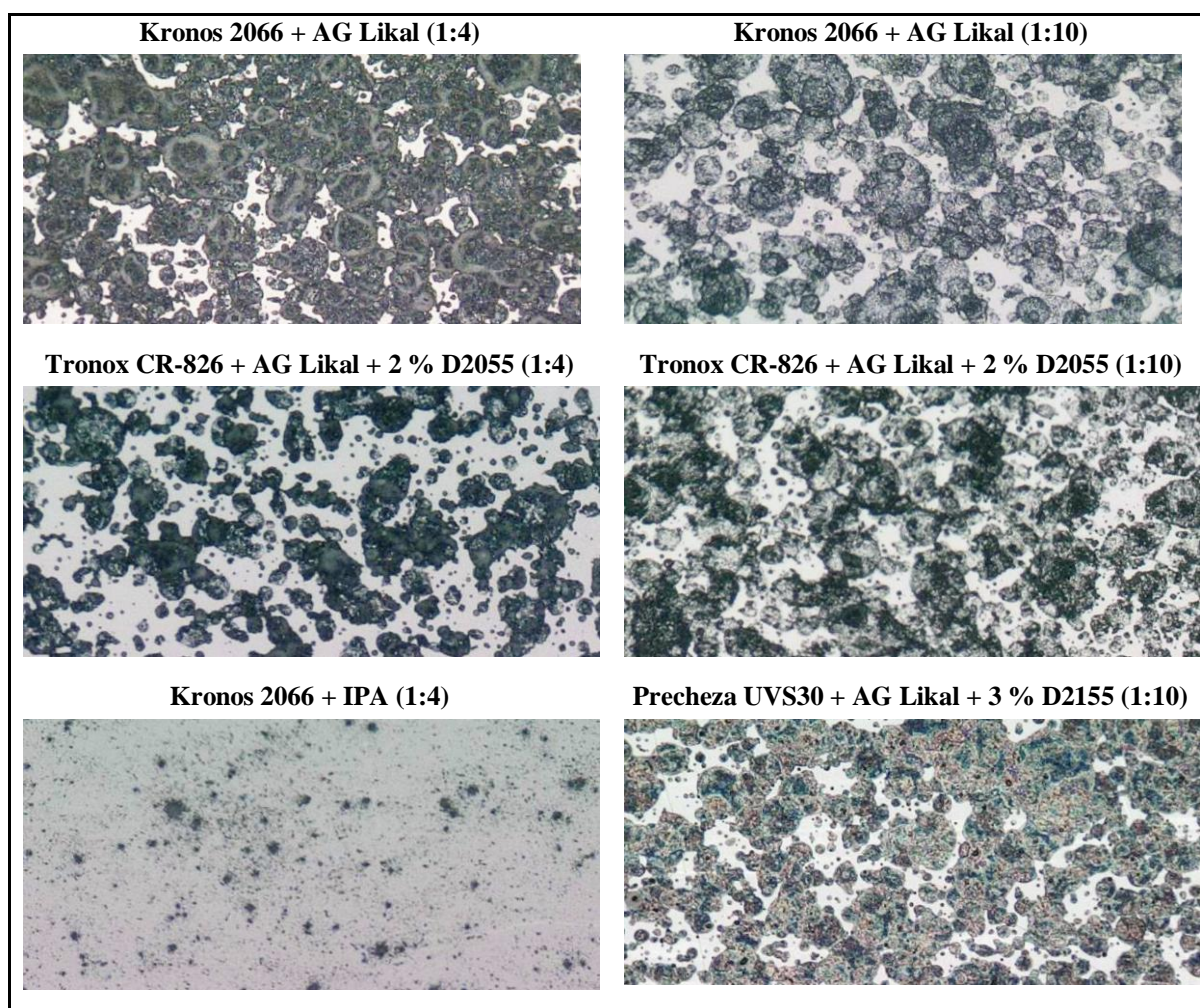
Z výsledků na Obr. 5-23 a Obr. 5-24 je patrné, že nejnižšího pokrytí destičky povlakem bylo dosahováno se suspenzemi *Kronos 2066 + IPA (1:4)* a *Tronox CR-826 + AG Likal + 2 % D2055 (1:4)*, které měly nejvyšší dynamické viskozity.



Obr. 5-24 Závislost překrytí povrchu nástřikem na počtu jeho vrstev pro různé suspenze

Z této analýzy bylo také možné stanovit závěr, jak se koncentrace pigmentu projevovala na nástřicích. Snížení koncentrace pigmentu v nosné kapalině vedlo ke snížení viskozity, díky čemuž bylo možné očekávat více kapek ve spreji, a tudíž i více překrytý povrch. Dle Obr. 5-23 však lze výraznější spád překrytí očekávat až od viskozity $\approx 2,3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. To bylo nejvíce patrné v případě suspenzí s práškem Tronox (viz Obr. 5-23 a Obr. 5-24).

Zde je nutné poznamenat, že překrytí zde bylo vyhodnocováno z makroskopického úhlu pohledu. Rozlišení této vyhodnocovací metody neumožňovalo zahrnout do detailu shluky částic oxidu titaničitého definovaných deponovanou kapkou. I přesto, že bylo makroskopické % překrytí povrchu u nástřiků z méně koncentrovaných suspenzí vyšší, nepředstavovalo to pro 3D skenování žádný benefit. Nástřiky ze suspenzí se sníženými koncentracemi měly pro účely 3D skenování horší optické vlastnosti. Výsledky 3D skenování byly uvedeny v kapitole 5.6.2. Důvod horších optických vlastností byl následující. Kapky v tomto případě obsahovaly zredukované množství pigmentu, což se po jejich dopadu na povrch destičky negativně projevilo na hustotě shluků částic TiO_2 v jednotlivých fragmentech povlaku (viz Obr. 5-25, snímky *nahoře a uprostřed*). Tmavé oblasti na Obr. 5-25 reprezentují zmatňující povlak.



Obr. 5-25 Snímky nástřiků provedených 1 přejezdem spreje z různých suspenzí. Nástřikové podmínky:
 $p = 0,5 \text{ bar}$, $Z = 50 \text{ mm}$; Tvar ústí – ostré konvergentní, (tmavé oblasti = povlak)

Na základě výsledků z analýzy % překrytí poté bylo potvrzeno, že suspenze tvořené z pigmentu Kronos 2066 a nosné kapaliny AG Likal jsou pro tvorbu nástřiků nejvhodnější, a to nejen kvůli jejich skvělé stabilitě, ale také díky jejich vhodné dynamické viskozitě. Stejně tak tyto suspenze umožňovaly nejvyšší míru překrytí (viz Obr. 5-24), což se pro samotnou aplikaci zdálo být velmi podstatné.

Při tvorbě a analýze nástřiků s práškem UVS30, bylo možné stanovit závěr, že tento typ titanové běloby nepředstavuje pro zmatňování povrchu žádný benefit. Suspenze s tímto práškem byla od prvních chvil nestabilní, kdy vytvořený kašovitý sediment zabraňoval atomizaci. Zastavení atomizace vlivem tohoto sedimentu pak bylo možné pozorovat v případě suspenze s hmotnostním poměrem 1:4. Suspenze s poměrem 1:10 obsahovala méně prášku, což se projevilo tak, že sediment většinou stále ještě umožňoval atomizaci, díky čemuž bylo možné ve většině případů nanést povlaky s vysokým překrytím destičky (viz Obr. 5-24). Nicméně, občasné se stávalo, že se sediment v zásobní nádobě usadil tak nevhodným způsobem, že začal působit na perforovanou destičku, čímž zabraňoval produkci aerosolu. Výkon pistole tak s tímto typem prášku kolísal, což je pro praktické použití pistole nevhodné. Stejně tak tento prášek nebyl vhodný ani pro účely 3D skenování. O tomto fenoménu bylo pojednáno v kapitole 5.6.2.

Prášek Tronox pak také nepředstavoval žádnou zásadní výhodu. Díky přidání disperzantu do nosné kapaliny narůstala viskozita suspenze, což se negativně projevovalo v překrytí referenčního povrchu nástřikem. Díky tomu pak tato suspenze neumožňovala tvorbu tak kvalitního povlaku, což se negativně projevilo v kvalitě naskenovaných dat.

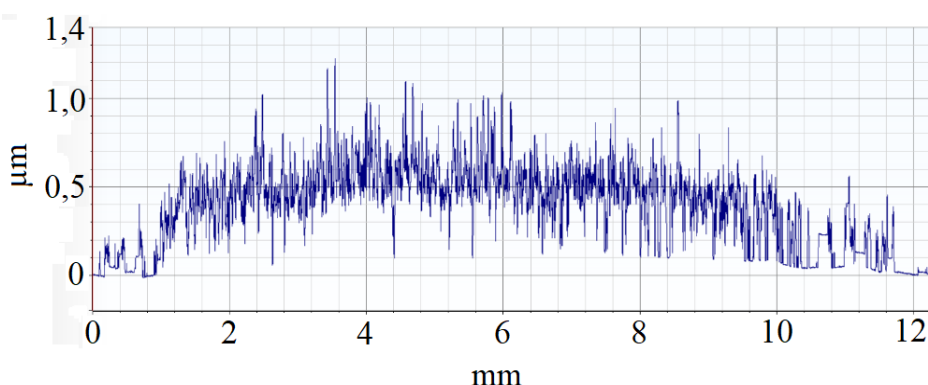
Analýza % překrytí povrchu umožnila také stanovit závěr, že isopropylalkohol není vhodnou substitucí za běžně používaný ethanolový prostředek AG Likal. V případě suspenze *Kronos 2066 + IPA (1:4)* bylo získáváno suverénně nejnižších % překrytí (viz Obr. 5-23 a Obr. 5-24), což bylo definováno nízkým výstupem kapek z atomizéru. IPA jako nosná kapalina tedy nepředstavuje žádný benefit, což bylo patrné již z měření na PDA, kdy byl *Data Rate* spreje z této látky oproti tomu z AG Likal výrazně zredukovaný (viz Obr. 5-13).

5.6.2 3D skenování a tloušťka povlaku

Z výsledků 3D skenování se poté projevilo to, co bylo řečeno již v kapitole 5.5.2, a tedy, že kvalita skenu je úzce spjata s kvalitou naneseného povlaku.

V této kapitole byly výsledky skenování rovnou porovnávány s tloušťkou jednotlivých povlaků, jelikož hlavním kritériem pro zmatňující nános byla nejenom kvalita skenu z něj vyplývající, ale také jeho tloušťka nepřesahující 1 μm . Výsledky 3D skenování a měření tloušťky povlaků jsou uvedeny v grafech na Obr. 5-29 a Obr. 5-30. Uvedená data odpovídají průměrným hodnotám.

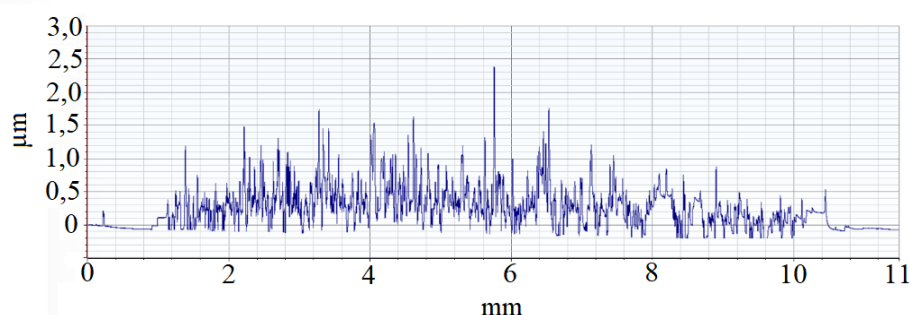
V tomto případě bylo opět potvrzeno to, že suspenze *Kronos 2066 + AG Likal (1:4)* je pro účely nánosů matných povlaků z uvažovaných suspenzí nejlepší materiál. Z grafů uvedených na Obr. 5-29 je patrné, že tato suspenze umožňuje dosáhnout nejlepšího poměru mezi zachycenou plochou skenerem, hodnotou standardní odchylky mračna bodů od referenční roviny a počtem nanesených vrstev. Výsledky ukázaly, že pro naskenování 100 % kontrolní oblasti bylo potřeba 2 přejezdů spreje, kdy hodnota *Sigma* byla pro obě orientace skenování pod hodnotou 0,0011 mm a tloušťka (resp. průměrná výška výstupku *Rc*) byla pod hodnotou 800 nm (viz Obr. 5-30). Tyto hodnoty byly brány jako přijatelné, jelikož tato vrstva by měla umožňovat 3D rekonstrukci s poměrně dobrou kvalitou bez ovlivnění přesnosti svojí tloušťkou. Profil této vrstvy pak působil poměrně rovnoměrně (viz Obr. 5-26). Na základě těchto výsledků tedy byly 2 vrstvy povlaku vytvořené při $Z = 50 \text{ mm}$ a $p = 0,5 \text{ bar}$ definovány jako vhodné parametry. Z grafů na Obr. 5-29 vlevo dole a vpravo dole bylo dále patrné, že pokud bylo nanášeno více vrstev nástřiků z této suspenze, docházelo k další redukci hodnoty *Sigma*, což hovořilo o lepší kvalitě skenů. Nicméně, zde už se začala projevovat vyšší tloušťka nanášeného povlaku, kdy její hodnota již začala přesahovat hodnotu 1 μm . Lze tedy konstatovat, že vyšší vrstva tohoto nástřiku umožňovala lépe eliminovat promítané světlo, které skener pro snímání využívá, nicméně za cenu tloušťky, která by již mohla mít negativní vliv na změnu geometrie zmatňovaného objektu.



Obr. 5-26 Profil nástřiku vytvořeného ze suspenze *Kronos 2066 + AG Likal (1:4)* se 2 vrstvami

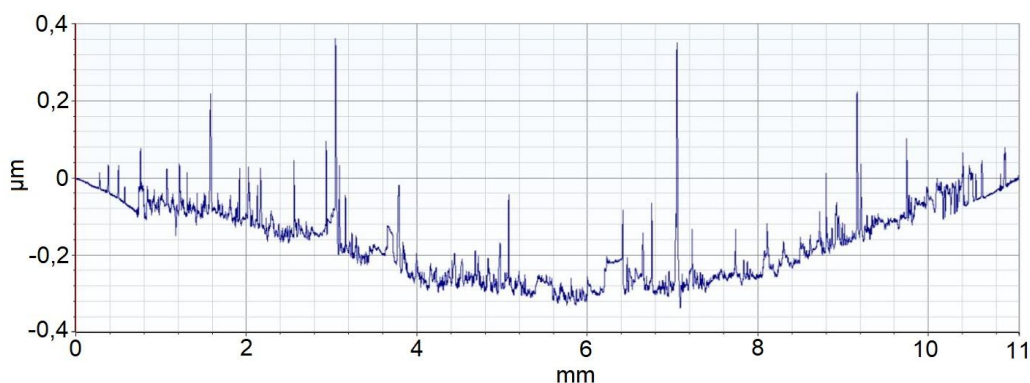
Z výsledků skenování uvedených na Obr. 5-29 se také ukázalo, že snížení hmotnostního poměru pigmentu k nosné kapalině z 1:4 na 1:10 vedlo k nástřikům s horšími optickými vlastnostmi. Zde se projevil fakt diskutovaný v předchozí kapitole 5.6.1, kdy snížení koncentrace vedlo k tvorbě fragmentů nástřiku definovaných depozicemi kapek s menší hustotou shluků titanové běloby (viz Obr. 5-25). To se poté projevilo tím, že hodnota *Sigma* byla pro skeny destičky zmatněné suspenzí s redukovanou koncentrací pigmentu vyšší. Výhoda snížené koncentrace se však projevila v tloušťce povlaku. Zreduované množství částic pigmentu vedlo k tomu, že nárůst tloušťky s počtem vrstev nebyl tak výrazný (viz Obr. 5-30).

Na Obr. 5-29 a Obr. 5-30 pak bylo možné také porovnat, jak se chovaly nástríky tvořené pigmentem Tronox. Bylo patrné, že tyto povlaky měly mnohem horší kvalitu naskenovaných dat v porovnání s práškem Kronos. Hodnota *Sigma* byla obecně vyšší. Nástríky provedené v poměru 1:4 poté disponovaly velmi nerovnoměrným profilem (viz Obr. 5-27), kde se mohla projevovat i vyšší míra nestability suspenze. To řešilo snížení jeho koncentrace v nosné kapalině, nicméně tento krok se negativně projevil na kvalitě skenů, kdy se *Sigma* posunula k vyšším hodnotám.



Obr. 5-27 Profil nástríku vytvořeného ze suspenze *TronoxCR-826 + AG Likal + 2 % D2055 (1:4)* se 2 vrstvami

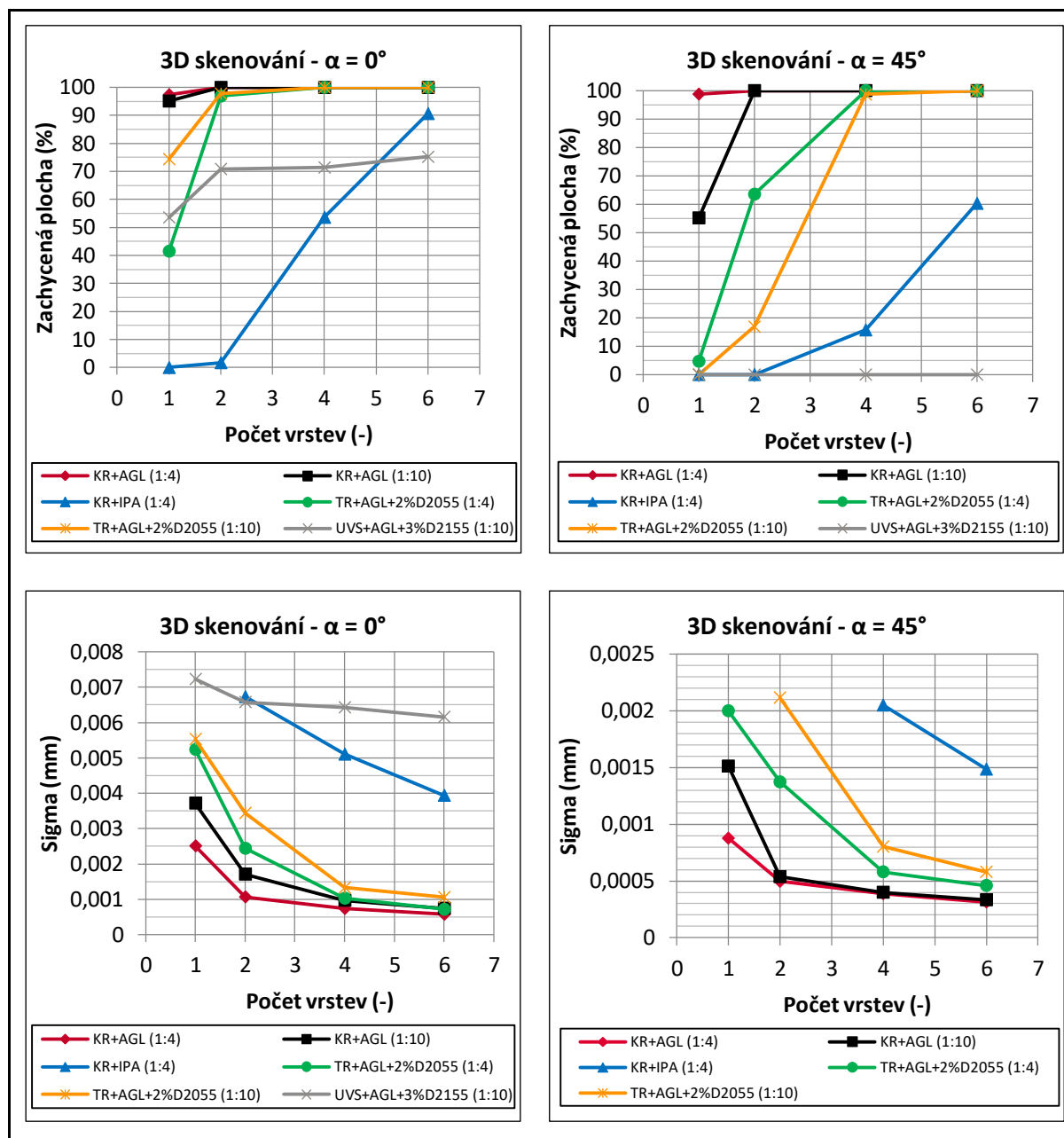
Prášek UVS30 poté vedl ke zdaleka nejhorším výsledkům. Z měření profilů bylo patrné, že tloušťka těchto nástríků byla velmi nízká (viz Obr. 5-28) a zásadně nenarůstala s počtem jeho vrstev (viz Obr. 5-30). Pro možné vysvětlení byla stanovena tato úvaha. Velké shluky, které byly v suspenzi přítomny (viz Obr. 5-1), se usadily v kašovitém sedimentu a ve zbytku suspenze, která byla atomizována, zbyly ve větší míře už jen shluky s menší velikostí, které pak definovaly nástrík. Pigment UVS30 byl nejmenší pigment, který byl v rámci této práce použit, což se projevilo i nejmenší průměrnou výškou profilu nástríků. To se zřejmě projevilo i ve zhoršené eliminaci problematických odrazů světla, což vyústilo v redukci velikosti nasnímaného mračna. Nejvíce patrné to bylo v případě snímání destičky, která byla nakloněna o 45°, kdy nebylo možné zachytit žádné mračno bodů ani s šesti vrstvami nástríku (viz Obr. 5-29). Stejně tak se zde mohla negativně projevit i sedimentace, která snížila koncentraci pigmentu ve zbytku suspenze, která byla atomizována. Zde je nutno podotknout, že profil nástríku uvedený na Obr. 5-28 je ovlivněn vlnitostí profilu křemíkové destičky, která v tomto případě činila ≈ 300 nm. Samotný povlak v tomto případě začínal od spodní kontury uvedeného profilu.



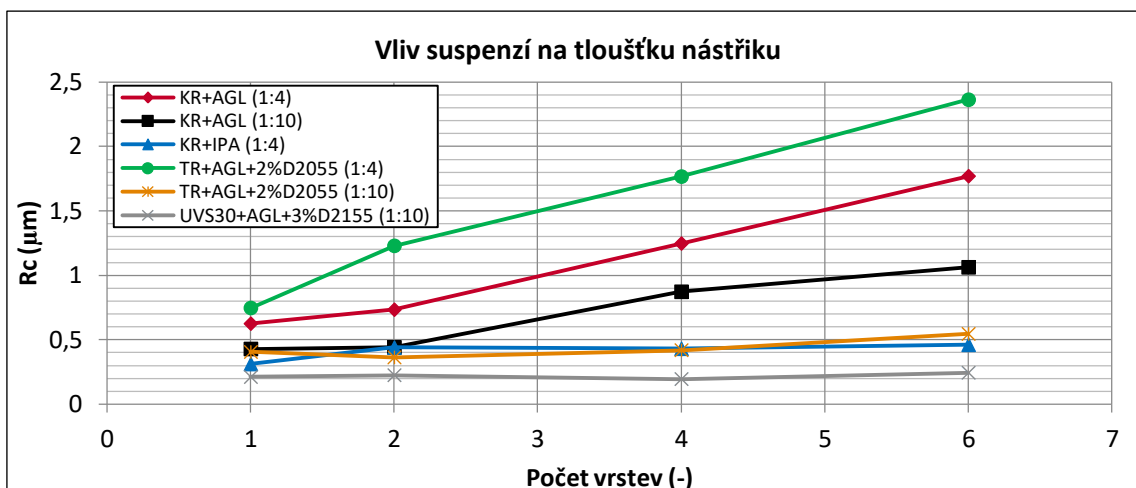
Obr. 5-28 Profil nástřiku vytvořeného ze suspenze *Precheza UVS30 + AG Likal + 3 % D2155 (1:4)* se 2 vrstvami

Analýza výsledků získaných 3D skenováním poté opět dokázala, že IPA není vhodnou nosnou kapalinou. Redukce kapek ve spreji vedla k méně překrytému povrchu, což se negativně projevilo i v naskenovaných datech. Hodnota *Sigma* byla vysoká a naskenovaná plocha byla značně zredukovaná (viz Obr. 5-29).

Vliv velikosti částic pigmentu na výsledky 3D skenování pak nebylo možné v rámci této práce jednoznačně určit. Jejich vliv na výsledky skenování byl v mnoha ohledech kombinací více faktorů, kdy roli mohla hrát například nerovnoměrnost distribuce velikostí částic pigmentu, jejich agregace, jejich vliv na vlastnosti suspenze a tudíž i na samotnou atomizaci, a tedy i podobu nástřiku.

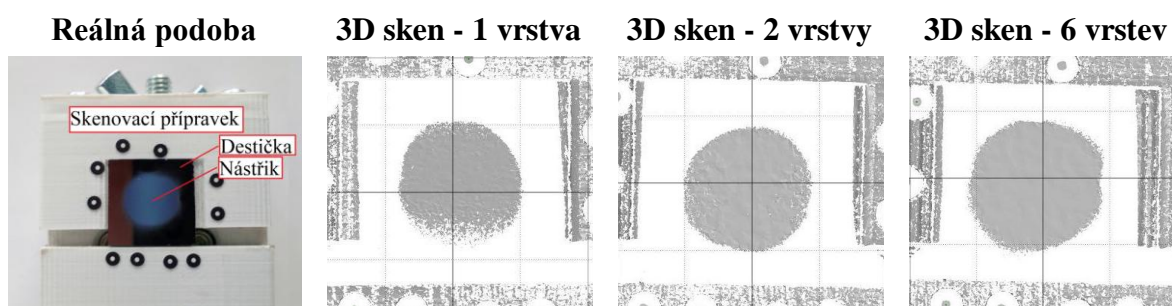


Obr. 5-29 Vliv suspenzí na 3D skenování. Závislost průměrné zachycené plochy na počtu vrstev nástřiku pro orientaci skenování 0° (vlevo nahoře) a 45° (vpravo nahoře). Závislost průměrné směrodatné odchylky mračna bodů od referenční roviny na počtu vrstev nástřiku pro orientaci skenování 0° (vlevo dole) a 45° (vpravo dole)



Obr. 5-30 Vliv suspenzí a počtu vrstev nástríku na průměrnou výšku profilu

Pro možnost porovnání kvality skenů byly na Obr. 5-31 uvedeny výsledky skenování pro nástríky vytvořené ze suspenze *Kronos 2066 + AG Likal (1:4)*, která byla definována jako nejlepší materiál pro aplikaci zmatňujících povlaků pro účely 3D skenování. Pro porovnání zde byly uvedeny skeny získané při orientaci skenování 0° po aplikaci 1, 2 a 6 vrstev nástríku.



Obr. 5-31 Výsledky skenování nástríků s počtem vrstev 1, 2 a 6, aplikovaných na křemíkové destičce.

Použitá suspenze: *Kronos 2066 + AG Likal (1:4)*. Podmínky nánosu: $Z = 50 \text{ mm}$; $p = 0,5 \text{ bar}$

5.7 Skenování reálných objektů

Tato kapitola měla ověřit, jak nástríky ovlivní skenování vybraných reálných součástí. Sledován byl nejenom vliv na délkový rozměr (skenování Johanssonovy měrky), ale také na možnou změnu geometrie v případě ostrého tvarového přechodu (skenování úhelníku s příložkou).

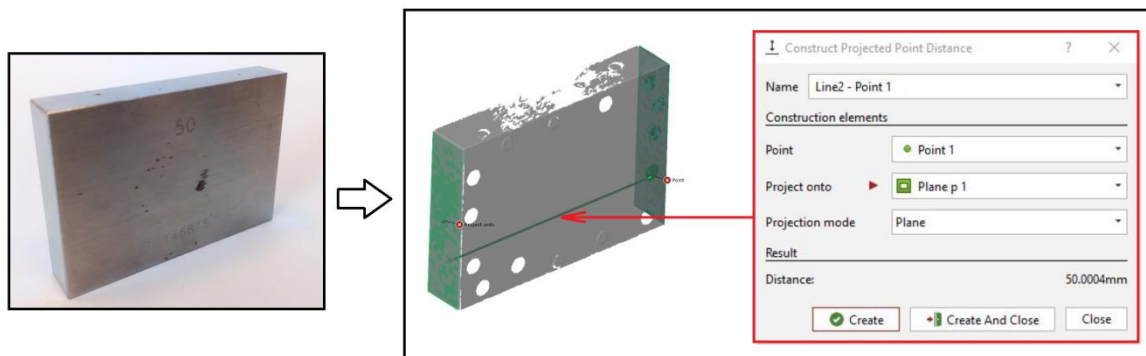
Johanssonova měrka

Výsledky skenování Johansonky ukázaly, že její hlavní rozměr bylo možné zachytit s přesností v řádech jednotek mikrometrů. V tomto případě se však na kvalitě skenu mohla podílet i volba expozičního času a přesnost složení skenů z jednotlivých snímků. V rámci skenování reálných objektů již nebylo možné geometrii zachytit jen jedním skenem, jako u předchozích analýz. Pro zachycení charakteristického rozměru objektu bylo potřeba minimálně dvou skenů. Výše uvedené parametry se poté promítaly i v opakovatelnosti měření. V rámci této analýzy bylo provedeno i skenování jednoho vzorku vícekrát, odkud bylo patrné, že dva různé skeny stejného objektu se od sebe mohly lišit až řádově v jednotkách mikrometrů. Výsledky tedy mohly být ovlivněny již i přesností a opakovatelností samotného skeneru. Dosažená přesnost měření by však byla pro běžnou inženýrskou praxi uspokojivá. V Tab. 5-5 je uvedena hodnota průměrné změřené délky Johansonky, její směrodatná odchylka a její rozdíl oproti nominálnímu rozměru měrky dle kalibračního listu. Uvedené hodnoty byly získány z třinácti provedených měření.

Tab. 5-5 Výsledky měření nominální délky Johansonky z naskenovaných dat

Parametr	Hodnota
Průměrná hodnota naměřeného základního rozměru (mm)	50,00225
Směrodatná odchylka naměřeného základního rozměru (mm)	0,00420
Rozdíl průměrné změřené hodnoty oproti kalibračnímu listu (mm)	0,00201

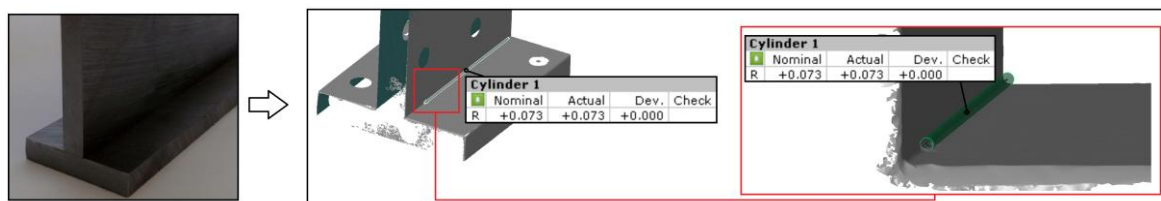
Výsledky skenování Johansonky jsou uvedeny na Obr. 5-32.



Obr. 5-32 Výsledky skenování Johansonky o nominálním rozměru 50,00024 mm

Úhelník s příložkou

V případě tohoto objektu bylo analyzováno nahromadění zmatňujícího materiálu v ostrém rohu. Z výsledného 3D skenu se potvrdilo, to co bylo očekáváno, a tedy, že tato metoda umožňuje nanést povlak bez zásadní změny ostrých tvarových přechodů (viz Obr. 5-33). Velikost zaoblení byla v tomto případě zanedbatelná ($R \approx 0,073$ mm) a souvisela spíše se samotnou polygonizací nežli s vlivem nástřiku. Na Obr. 5-33 je také patrné, jak se lišil sken z oblasti s nástřikem a z oblasti bez něj. Čelo úhelníku v tomto případě nebylo přímo zmatněno, což vedlo k tomu, že tato oblast zůstala téměř nenaskenovaná.



Obr. 5-33 Výsledky skenování úhelníku s příložkou

6 DISKUSE

6.1 Nástřiková pistole

V rámci této práce byla modifikována původní podoba nánosové pistole, kdy bylo snahou zjednodušit některé její díly, zajistit její těsnost a mírně upravit dutinu, ve které proudí atomizovaná suspenze. Výsledkem úpravy dutiny byla eliminace ostrého tvarového přechodu u ústí pistole a odstranění šroubových spojů, které zasahovaly do jejího prostoru. Nově bylo také přepracováno upevnění atomizéru, které bylo nyní řešeno jednodušším uchycením mezi dvě rovinné plochy. Na pistoli byl také umístěn větší zásobník pro zmatňovací suspenzi a zásobník na odvod kondenzátu mimo tělo pistole. Tato sestava se v praxi ukázala jako funkční, kdy nedocházelo k volnému odkapávání nahromaděného kondenzátu do okolního prostoru. Nově byla na pistoli připevněna také řídicí elektronika, díky čemuž byl zajištěn větší komfort při ručních nánosech.

Z hlediska použitelnosti tohoto zařízení pro běžnou aplikaci působí koncepce robustně a nabízí poměrně konzistentní zmatňovací výkon. I u této pistole však musí být dbáno na údržbu. Jedná se především o občasné rozebrání sestavy uchycení atomizéru a její vyčištění. Pokud pistole není nějakou dobu používána, může v okolí atomizéru zůstat nahromaděný pigment vlivem odpaření nosné kapaliny. Aby byl eliminován jeho případný vliv na další nástřiky je doporučeno tento konstrukční uzel pravidelně udržívat.

6.2 Vytvořený sprej

V této práci bylo prokázáno, že na podobu spreje má vliv především tryska ofukovací pistole. Ústí nánosové pistole zde sehrávalo roli především při strhávání kapek do rychle proudícího vzduchu. Tryska v tomto případě definovala kónický tvar spreje, který měl podobu stabilní vírové struktury. Úhel, který pokrýval přibližně 90 % objemového průtoku spreje, byl okolo 13,5°. Velikost tohoto úhlu byla odvozena z měření na PDA.

Velikost axiální rychlosti nebyla závislá na atomizované kapalině, ale byla spjata pouze s velikostí přetlaku vzduchu, axiální vzdáleností a poloměrem spreje. Průběh rychlosti po poloměru spreje měl v tomto případě průběh odpovídající zvonové křivce. Samotný proud vzduchu však nedefinoval jen tvar spreje, ale také rozložení velikosti kapek v něm obsažených a vývoj jejich objemového průtoku jednotlivými místy. Bylo patrné, že proud vzduchu se může podílet i na tzv. sekundární atomizaci. Sprej urychlený hnacím proudem vzduchu měl distribuci kapek posunutou k menším hodnotám jejich průměrů. To se však zdálo být výhodné, jelikož menší kapky by měly být méně náchylné

na rozstřík po dopadu na zmatňovaný povrch. Z hlediska objemového průtoku spreje se pro aplikaci nástřiků zdála být vhodná úst'ová vzdálenost 50 mm. Tok kapek zde byl vysoký, rovnoměrně distribuovaný ve středu spreje a sprej se zde choval stabilně. Měření na PDA také ukázalo, že z hlediska toku kapek je vhodné volit přetlak okolo 0,5 bar, kdy byl *Data Rate* kapek z jednotlivých měření nejvyšší. Tyto předpoklady potvrdily i výsledky dosažené ve studii, která se zabývala vlivem procesních parametrů na nástřik a 3D skenování.

Měření na PDA také umožnilo stanovit závěr, že isopropylalkohol není vhodná substituce za běžně používanou nosnou kapalinu AG Likal. Sprej z IPA obsahoval výrazně zredukované množství kapek. To se poté potvrdilo i ve studii vlivu různých suspenzí na vytvořené nástřiky a 3D skenování.

V rámci analýzy spreje byly zkoumány také různé koncovky ústí nástřikové pistole. Z běžného provozu bylo evidentní, že původně používané válcové ústí vytváří v oblasti strhávání kapek do proudu vzduchu menší nestabilitu, která se projevovala v celkovém chování spreje. Sprej v tomto případě jakoby fluktoval okolo své osy. Toto chování odstranilo ostré konvergentní ústí, které se zdálo být vhodnější i z hlediska efektivity strhávání kapek do proudu vzduchu.

6.3 Vliv procesních parametrů na nástřik a 3D skenování

Z provedených experimentů bylo jasně patrné, že velikost přetlaku hnacího proudu vzduchu a úst'ová vzdálenost spreje má zásadní vliv na % překrytí povrchu nástřikem. Pokud byla zvolena úst'ová vzdálenost 50 mm s přetlakem vzduchu 0,5 bar, bylo možné povrch po 1 přejezdu spreje (rychlost přejezdu $0,144 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) zmatnit s překrytím více než 70 %. Toto nastavení úst'ové vzdálenosti a přetlaku bylo v rámci této práce stanoveno jako doporučené. Sprej se při tvorbě nástřiku choval stabilně, disponoval vysokým průtokem kapek, zatímco energie dopadu kapek měla teoreticky vést k dominanci požadovaného režimu depozice. Predikci režimu dopadu kapek je však potřeba chápat spíše informativně. Je to z toho důvodu, že proces dopadu spreje na pevný povrch je velmi komplexní problém, kde může hrát roli mnoho faktorů. Lze očekávat, že ve výsledném povlaku se mohla odrážet například i interakce mezi jednotlivými kapkami, laterální posuv spreje nebo samotný tok a distribuce velikostí kapek napříč poloměrem spreje. Díky tomu nebylo možné vliv režimu dopadu kapek na nanesený povlak zcela jednoznačně určit. V souvislosti s výše uvedeným nastavením je pak potřeba počítat také s tím, že okraj spreje tvoří povlak s mírně řidším překrytím povrchu. Efektivní poloměr spreje je v tomto případě okolo 4 mm. To je v reálné aplikaci potřeba uvažovat při plánování přejezdů spreje přes zmatňovaný objekt. Zde je také potřeba zmínit, že vhodným nastavením rychlosti

přejezdu spreje s vhodným překrytím jeho jednotlivých trajektorií by mělo být možné nanést kvalitní nános i po pouhém jednom přejezdu spreje přes zmatňovaný objekt.

V případě studování vlivu procesních parametrů na nástřík byla používána suspenze *Kronos 2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4. Při porovnání nástřiků provedených s výše uvedeným nastavením s těmi získanými v pracích Hruboš [1, 16], bylo evidentní, že výše uvedené parametry umožnily nanést nástřík s překrytím přesahujícím 70 % s 14krát menším počtem přejezdů spreje přes referenční povrch. V tomto případě byly podmínky nánosu podobné. Jediné, co se výrazně lišilo, byla použitá úst'ová vzdálenost při nástřicích, která byla u prací Hruboš [1, 16] 100 mm.

Na nástřicích se také ukázalo to, že tvar ústí pistole neměl zásadní vliv na jejich podobu. Hlavní vliv náležel trysce ofukovací pistole. Nicméně, i přesto bylo možné stanovit to, že ostré konvergentní ústí nabízelo ve většině případů mírně vyšší překrytí povrchu. To mohlo být zapříčiněno lepší stabilitou spreje i lepší efektivitou strhávání kapek do hnacího vzduchu. Ostré konvergentní ústí tedy bylo doporučeno pro další použití této nánosové pistole.

Výsledky dosažené 3D skenováním ukázaly silnou korelaci mezi % překrytím povrchu nástřikem a kvalitou naskenovaných dat. Zde se potvrdilo také to, co bylo zmíněno v předchozích pracích Hruboš [1, 16], a tedy že pro zachycení alespoň nějakého mračna bodů je potřeba přibližně 40% překrytí povrchu nástřikem ze suspenze *Kronos 2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4. Stejně tak se potvrdilo to, že skenování destičky pod úhlem 0° (tj. destička nebyla vůči skeneru nakloněna), představovalo pro 3D rekonstrukci horší podmínky, kdy byly hodnoty *Sigma* vyšší. Pro zachycení celé kontrolní oblasti bylo potřeba $\approx 85\%$ překrytí povrchu nástřikem z této suspenze. To přibližně platilo pro obě skenovací orientace. S nárůstem překrytí povrchu povlakem se obecně zvyšoval rozsah zachyceného mračna, zatímco se odchylka bodů od referenční roviny (definované plochou křemíkové destičky) postupně snižovala. Snižování hodnoty *Sigma* značilo lepší eliminaci problematických odrazů strukturovaného světla naneseným povlakem.

Analýza procesních parametrů nástřikové pistole byla provedena vždy na jedné vrstvě nástřiku (tj. 1 přejezd spreje přes křemíkovou destičku). Na takto vytvořeném nástřiku pak bylo možné pozorovat vliv procesních parametrů i na jeho tloušťku. Zde bylo zjištěno, že tloušťka 1 vrstvy se pohybuje v rozmezí 200 až 600 nm, což bylo velmi blízké výsledkům získaných v předchozích pracích Hruboš [1, 16]. Horní hranice tloušťky byla většinou dosahována u nástřiků vytvořených v blízké úst'ové vzdálenosti 50 mm. V tomto případě mohla hrát roli pravděpodobnost dopadu více kapek přes sebe, jelikož tok kapek napříč poloměrem spreje byl při tomto nastavení vyšší. Vliv velikosti přetlaku hnacího proudu vzduchu na tloušťku vrstvy se nezdál být zásadní. Tloušťka 1 vrstvy nástřiku byla ovlivněna především velikostí částic titanového prášku a pravděpodobností dopadu více kapek na sebe.

6.4 Vliv různých suspenzí na nástřik a 3D skenování

Na základě této analýzy byl stanoven závěr, že fyzikální vlastnosti suspenzí mají zásadní vliv na podobu nástřiku, a tedy i na kvalitu naskenovaného mračna bodů. Důležitým parametrem suspenze se zdála být především její viskozita. Viskozita se zřejmě přímo podílela na množství kapek, které atomizér produkoval, což se poté projevilo v toku kapek ve spreji, a tedy i v samotném nástřiku. Vliv viskozity na výstup membránového atomizéru byl zkoumán i v práci Ghazanfari [33], kde bylo zmíněno, že vyšší viskozita kapaliny může vést k redukci, nebo až k úplnému zastavení atomizace. To se zřejmě projevovalo i zde, kdy bylo patrné, že suspenze s vyšší viskozitou vytvářely nástříky s výrazně nižším % překrytím povrchu. Nicméně výraznější spád překrytí povrchu byl pozorován u suspenzí, které měly dynamické viskozity vyšší jak $\approx 2,3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Tato analýza také potvrdila to, co bylo řečeno již v minulých pracích Hruboš [1, 16], a tedy, že suspenze s práškem *Kronos 2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4 je pro aplikaci nástřiků nejvhodnějším materiálem. V tomto případě bylo možné po 2 přejezdech spreje (s procesními parametry $Z = 50 \text{ mm}$, $p = 0,5 \text{ bar}$, $v = 0,144 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) dosáhnout suverénně nejlepších výsledků ze všech použitých suspenzí. Kontrolní oblast byla naskenována celá a velikost odchylky mračna bodů vůči referenční rovině byla uspokojivá ($\approx \text{Sigma} < 1 \mu\text{m}$), kdy směrodatná odchylka hodnoty *Sigma* pro jednotlivé vzorky byla v řádech setin mikrometrů. Průměrná výška profilu tohoto povlaku pak nepřesahovala hodnotu 800 nm, což je tloušťka v požadovaném rozsahu. Výhoda tohoto materiálu spočívala ve vhodné kombinaci jeho viskozity, stability a koncentrace zmatňujícího pigmentu.

Prášek Precheza UVS30 ani Tronox CR-826 nebyly dále doporučeny pro další aplikace. Nevýhoda běloby UVS30 spočívala v její nestabilitě, ale také ve špatných optických vlastnostech pro účely 3D skenování. Tento prášek tvořil, i v případě přidání Disperbyku, kašovitý sediment, který se v případě vyšších hmotnostních poměrů projevoval zastavením nebo přerušováním atomizace. Prášek Tronox CR-826 poté nebyl doporučen i přesto, že se v jeho suspenzi podařilo výrazně potlačit projevy sedimentace přidáním Disperbyku. Přidání disperzantu se negativně projevilo zvýšením dynamické viskozity látky, která již měla výraznější vliv na množství vyprodukovaných kapek atomizérem. Takové chování se negativně projevilo v nanesené vrstvě, a tudíž i při 3D skenování.

Ukázalo se také, proč je potřeba volit suspenze s vyšší koncentrací pigmentu. I přesto, že redukce pigmentu vede ke snížení dynamické viskozity, což se může projevit vyšším překrytím povrchu, nepředstavuje to pro účely 3D skenování zásadní výhodu. Důvodem je redukce pigmentu ve fragmentech samotného povlaku, což snižuje jeho efektivitu při 3D skenování. Nástřiky vytvořené se zredukovaným množstvím pigmentu obecně vedly ke skenům s vyšší hodnotou *Sigma*. Výhoda méně koncentrovaných suspenzí se však projevila v tloušťce nanesených vrstev. V tomto případě tloušťka s počtem vrstev nástřiku narůstala pomaleji.

Bylo také možné stanovit hypotézu proč je potřeba volit stabilní suspenze. Tj. suspenze bez projevů sedimentace. Pokud suspenze sedimentuje, dochází v ní k tvorbě dvou fází s rozdílnou koncentrací pigmentu. Ta, která má vyšší koncentraci (tj. sedimentovaná část), by měla mít vyšší viskozitu, což se může negativně projevit v množství atomizérem vyprodukovaných kapek. Ve zbytku suspenze je poté redukováné množství pigmentu. To by mělo teoreticky přispívat k lepší atomizaci, nicméně redukováné množství pigmentu se může projevit v horších optických vlastnostech deponovaného povlaku.

6.5 Ruční aplikace povlaku a skenování reálných součástí

Jedním z objektů, který zde byl zmatňován a skenován, byla Johanssonova měrka s nominálním rozměrem dle kalibračního listu 50,00024 mm. Ze skenování tohoto objektu bylo patrné, že kvalita nástřiku byla dostatečná pro kompletní zachycení obou protilehlých ploch, které definují jeho základní rozměr. Z tohoto experimentu se ukázalo, že nástřiková pistole je robustní i pro běžné ruční aplikace. V tomto případě bylo snahou nástřiky provádět ve vzdálenosti přibližně 50 mm, s přetlakem hnacího vzduchu nastaveným na hodnotu 0,5 bar. Jako zmatňovací materiál byla vybrána suspenze s nejlepšími vlastnostmi, a tedy *Kronos 2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4. Rozměrová analýza získaných skenů ukázala, že hlavní rozměr Johansonky bylo možné zachytit s hodnotou $50,00225 \pm 0,00420$ mm. V tomto případě se však v celkovém procesu mohla projevovat už i přesnost a opakovatelnost samotného skeneru. Obecně však lze tuto odchylku považovat pro inženýrskou praxi za uspokojivou.

V rámci skenování ostrého tvarového přechodu úhelníku s příložkou se potvrdil další benefit této nástřikové metody, který byl diskutován již v práci Valinasab [17]. Tato výhoda spočívala v tom, že aplikovaný povlak, díky své velmi malé tloušťce, v zásadě nezkrsluje rekonstruovanou geometrii.

7 ZÁVĚR

Pro účely této práce bylo využito konceptu atomizační nánosové pistole, který byl vyvinut v rámci předchozí diplomové práce. Základ tohoto nástřikového zařízení tvoří atomizér s vibrující membránou a vzduchová ofukovací pistole. Původní koncepce byla v rámci této práce modifikována za účelem zjednodušení některých komponentů, odstranění ostrých tvarových přechodů v rámci hlavní dutiny a také za účelem umístění řídicí jednotky přímo na tělo zařízení.

Hlavním cílem práce bylo popsat a objasnit proces tvorby zmatňujícího nástřiku a definovat vstupní parametry, které mohou ovlivňovat jeho výslednou podobu. Základem práce byla především detailní analýza vytvořeného spreje, který vznikl urychlením atomizérem generovaného aerosolu hnacím proudem vzduchu. Ukázalo se, jak klíčovou roli v celém řetězci hraje centrální proud vzduchu. Ten definuje nejenom tvar spreje a urychlení kapek, ale také jejich velikostní a objemovou distribuci napříč celým sprejem. Sepnutí hnacího proudu vzduchu obecně vedlo k tvorbě rovnoměrnějšího spreje se středem distribuce průměru kapek okolo hodnot 2 až 2,6 μm . V tomto případě byly vysokou energií vzduchu (oproti neurychlenému aerosolu) eliminovány větší kapky, což se pro depozici zmatňujících povlaků zdálo být výhodné. Menší kapky by měly být méně náchylné na jejich rozstříknutí po dopadu na pevný povrch. Důležitým parametrem při depozici nástřiků byla úst'ová vzdálenost spreje a velikost použitého přetlaku hnacího proudu vzduchu. Z výsledků dosažených v rámci této práce bylo doporučeno nastavení úst'ové vzdálenosti $Z = 50 \text{ mm}$ s přetlakem vzduchu $p = 0,5 \text{ bar}$. Díky tomuto nastavení bylo možné po 1 přejezdu spreje (vytvořeného ze suspenze *Kronos 2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4) cíleně dosáhnout více než 70% překrytí referenčního povrchu nástřikem. Sprej se při tomto nastavení choval stabilně a disponoval vysokým průtokem kapek s příznivou energií pro jejich teoretickou depozici na zmatňovaný objekt.

V rámci analýzy vytvořeného spreje byl zkoumán také vliv geometrie ústí nánosové pistole. To však definovalo pouze strhávání kapek do hnacího proudu vzduchu. Celková podoba spreje byla primárně určena tryskou ofukovací pistole. Koncovka nástřikové pistole však měla vliv na celkovou stabilitu spreje a efektivitu strhávání kapek do proudu vzduchu. Bylo zjištěno, že původní válcové ústí vytvářelo v oblasti strhávání kapek mírně nestabilní strukturu proudění, která se projevovala tím, že sprej jakoby fluktoval okolo své osy. Na základě toho byly provedeny analýzy i jiných geometrií koncovek pistole, ze kterých nejlépe vycházelo ostré konvergentní ústí. Sprej generovaný společně s touto koncovkou působil stabilněji a dle stanovených hypotéz měl také vést k lepší efektivitě strhávání kapek do hnacího proudu vzduchu. Výhoda ostrého konvergentního ústí oproti válcovému se poté projevila i při aplikaci nástřiků, kdy bylo % překrytí referenčního povrchu mírně vyšší. Nicméně, tento rozdíl nebyl nějak dramatický, což potvrdovalo to, že podoba nástřiku byla primárně definována tryskou ofukovací pistole.

Ukázalo se také to, že fyzikální vlastnosti suspenzí mohou mít zásadní vliv na podobu zmatňujícího nástřiku. V rámci této práce byl hlavní vliv přisuzován viskozitě. Více viskózní suspenze vedly k nástřikům se sníženým % překrytím povrchu. To naznačovalo tomu, že více viskózní suspenze vedly ke snížení množství aerosolu vystupujícího z atomizéru, což se negativně odrazilo i v počtu kapek ve výsledném spreji, a tedy i v samotném nástřiku. Z tohoto důvodu nebyly pro aplikaci nástřiků vhodné suspenze na bázi isopropylalkoholu, které vedly k tvorbě povlaku se značně sníženým % překrytím povrchu. V tomto případě ani po nánosu 6 vrstev, ze suspenze *Kronos 2066 + IPA* s hmotnostním poměrem 1:4, nebylo dosaženo více než $\approx 65\%$ překrytí. Ukázalo se také to, že ani suspenze s bělobou Tronox CR-826 nejsou pro aplikaci nástřiků vhodné. Aby u těchto suspenzí byla zajištěna stabilita, bylo do směsi nutné přidat disperzant. Jeho přítomnost však vyústila ve zvýšení viskozity celé suspenze, což vedlo k tomu, že výsledné překrytí povrchu bylo zredukované. Zmenšení viskozity však v tomto ohledu mohlo být zajištěno snížením koncentrace titanové běloby v suspenzi. Díky tomu bylo obecně možné očekávat více kapek ve spreji, nicméně menší podíl titanové běloby v nástřicích vedl k povlakům s horšími optickými vlastnostmi. To se projevilo ve zhoršené kvalitě 3D skenů, což bylo nežádoucí. Ani prášek Precheza UVS30 poté nevedl k dobrým výsledkům. Suspenze s touto bělobou bylo možné označit jako nevhodné pro samotnou aplikaci. Tento závěr byl stanoven na základě jejich špatné stability, která mohla vést až k přerušení atomizace, a také na základě výsledků z 3D skenování, kdy jejich povlaky vedly ke zdaleka nejhorším skenům. Tato práce potvrdila to, že suspenze *Kronos 2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4 je z uvažovaných materiálů tím nejlepším a je tedy pro tvorbu zmatňujících nástřiků doporučena. Vhodnost spočívala v dobrém poměru viskozity, stability a koncentrace zmatňujícího pigmentu.

Výsledky 3D skenování ukázaly silnou závislost mezi % překrytím povrchu a kvalitou skenu. V případě suspenze *Kronos 2066 + AG Likal* s hmotnostním poměrem 1:4 platilo, že aby bylo naskenováno alespoň nějaké mračno je potřeba povrch zmatnit alespoň se 40% překrytím. Pro naskenování celé kontrolní oblasti bylo potřeba docílit překrytí povrchu rovnajícímu se přibližně 85 %. S nárůstem překrytí povrchu nástřikem poté bylo docíleno i lepší kvality skenu z hlediska odchylky mračna bodů *Sigma* vůči referenční rovině. Lepší sken disponoval menší hodnotou *Sigma*. Na kvalitu naskenovaného mračna poté měla vliv i tloušťka samotného nástřiku. Pro povlak s tloušťkou $0,73\ \mu\text{m}$ byla odchylka *Sigma* (v případě skenování neodkloněné destičky) okolo $1,07\ \mu\text{m}$, zatímco pro povlak s tloušťkou okolo $1,77\ \mu\text{m}$ hodnota *Sigma* činila $\approx 0,57\ \mu\text{m}$. Z toho bylo patrné, že v případě nárůstu tloušťky povlaku docházelo k dalšímu snížení hodnoty *Sigma* díky lepší eliminaci problematických odrazů strukturovaného světla od povrchu skenované křemíkové destičky. Na základě experimentů, které byly s touto suspenzí provedeny na referenčních destičkách, byl stanoven závěr, že dva přejezdy spreje (tj. 2 vrstvy povlaku) při nánosu z ústové vzdálenosti $Z = 50\ \text{mm}$ s přetlakem hnacího proudu vzduchu $p = 0,5\ \text{bar}$ jsou pro inženýrskou praxi zcela uspokojivé. Tloušťka povlaku byla v tomto

případě v požadovaném rozsahu, kdy průměrná velikost výstupku profilu R_c nepřesahovala hodnotou 800 nm a standardní odchylka mračna bodů vůči referenční rovině (definované skenem destičky) byla i pro nejhorší případ skenování (tj. destička nebyla vůči skeneru odkloněna) pod hodnotou 1,1 μm .

Zde je potřeba zmínit, že základní série měření byly provedeny automatizovaně, aby byl eliminován lidský faktor. V rámci této práce však byla zkoumána také robustnost této metody pro běžné ruční nástřiky a běžné neautomatizované skenování. Tj. situace, kdy může být kvalita povlaku i výsledný sken ovlivněn lidským faktorem. V tomto případě byla zmatňována a skenována Johanssonova měrka s nominálním rozměrem dle kalibračního listu 50,00024 mm. V tomto případě byl přetlak vzduchu nastaven na doporučenou hodnotu 0,5 bar a bylo snahou při nástřiku dodržovat úst'ovou vzdálenost spreje okolo 50 mm. Výsledná rozměrová analýza 13 nezávislých skenů Johansonky ukázala, že její nominální rozměr bylo možné zachytit s přesností v řádech jednotek mikrometrů. Rozsah naměřených hodnot byl v tomto případě $50,00225 \pm 0,00420$ mm. V tomto případě se však mohla projevovat už i opakovatelnost a přesnost samotného skeneru. I přesto bylo možné z těchto výsledků stanovit, že přesnost změřeného rozměru v řádech jednotek mikrometrů je pro běžnou inženýrskou praxi uspokojivá. Práce pak také potvrdila vhodnost této nástřikové metody pro 3D rekonstrukci objektů s ostrými tvarovými přechody, kdy byl v rámci jedné z analýz zmatněn a naskenován ostrý roh úhelníku s příložkou. Z výsledků bylo patrné, že geometrie skenu byla aplikovaným povlakem v podstatě nezměněna. To potvrdilo další benefit této zmatňovací pistole.

Závěrem lze říci, že pokud byla zvolena vhodná suspenze s vhodnými procesními parametry, byly nástřiky z této pistole konzistentní, což poukazovalo na celkovou robustnost tohoto zařízení.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HRUBOŠ, D. Aplikace velmi tenkých zmatňujících nástřiků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství . 2018, s. 93 Vedoucí diplomové práce Ing.Tomáš Koutecký Ph.D.
- [2] SANSONI, Giovanna, Marco TREBESCHI a Franco DOCCHIO. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation. *Sensors*. 2009, roč. 9, č. 1, s. 568–601. ISSN 14248220.
- [3] MARTÍNEZ, S., E. CUESTA, J. BARREIRO a B. ÁLVAREZ. Methodology for comparison of laser digitizing versus contact systems in dimensional control. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010, roč. 48, č. 12, s. 1238–1246. ISSN 01438166.
- [4] LEMES, S. a N. ZAIMOVIC-UZUNOVIC. Study of Ambient Light Influence on Laser 3D Scanning. In: *7th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies*. 2009, s. 327–330. ISBN 978-961-6692-01-4.
- [5] ZAIMOVIC-UZUNOVIC, Nermina a Samir LEMES. Influences of Surface Parameters On Laser 3D Scanning. In: *IMEKO Conference Proceedings: International Symposium on Measurement and Quality Control 2010*. 2010, s. D4-026–1–D4-026–4. ISBN 9781617820199.
- [6] IHRKE, Ivo, Kiriakos N. KUTULAKOS, Hendrik P.A. LENSCH, Marcus MAGNOR a Wolfgang HEIDRICH. Transparent and specular object reconstruction. *Computer Graphics Forum*. 2010, roč. 29, č. 8, s. 2400–2426. ISSN 14678659.
- [7] WANG, Yutao a Hsi-Yung FENG. Modeling outlier formation in scanning reflective surfaces using a laser stripe scanner. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2014, roč. 57, s. 108–121. ISSN 02632241.
- [8] CHEN, Tongbo, Hendrik P.A. LENSCH, Christian FUCHS a Hans Peter SEIDEL. Polarization and phase-shifting for 3D scanning of translucent objects. In: *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007, s. 1–8. ISBN 1424411807.
- [9] MORRIS, Nigel J.W. a Kiriakos N. KUTULAKOS. Reconstructing the surface of inhomogeneous transparent scenes by scatter-trace photography. In: *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision*. 2007, s. 1–8.
- [10] EREN, Gonen, Olivier AUBRETON, Fabrice MERIAUDEAU, L. A. SANCHEZ SECADES, David FOFL, A. Teoman NASKALI, Frederic TRUCHETET a Aytul ERCIL. A 3D scanner for transparent glass. In: *Foggia P., Sansone C., Vento M. (eds) Image Analysis and Processing – ICIAP 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5716*. 2009. ISBN 978-3-642-04146-4.
- [11] MAENG, Hee-young a Myoungsang LEE. A Study on the Exploration of Electrostatic Powder Coating Materials Suitable for 3D Scanning. In: *MATEC Web of Conferences*. 2016, s. 1–5.
- [12] ARTEC EUROPE. Artec 3D support center. Scanning sprays [online] [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://artecgroup.zendesk.com/hc/en-us/articles/205338441-Scanning-sprays>

- [13] CYBEROPTICS CORPORATION. 3D Scan Spray. About 3D Scan Spray [online] [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://3dscanspray.com/3d-spray-features/>
- [14] MILLS, Keith. Metrology News. Self Vanishing 3D Scanning Spray [online] [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://metrology.news/self-vanishing-3d-scanning-spray-launched/>
- [15] PALOUSEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNY, Josef BEDNAR, Tomas KOUTECKY a Filip DOKOUPIL. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials*. 2015, roč. 40, s. 1–9. ISSN 09253467.
- [16] HRUBOŠ, David, Tomáš KOUTECKÝ a David PALOUŠEK. An experimental study for determination of an application method and TiO₂ powder to ensure the thinnest matte coating layer for 3D optical scanning. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2019, roč. 136, s. 42–49. ISSN 02632241.
- [17] VALINASAB, Behzad, Maxym RUKOSUYEV, Jason LEE, Junghyuk KO a Martin B.G. JUN. Improvement of Optical 3D Scanner Performance Using Atomization-Based Spray Coating. *Atomization-based Spray Coating for Improved 3D Scanning* [online] [cit. 2020-06-20]. 2015. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/277644862_Improvement_of_Optical_3D_Scanner_Performance_Using_Atomization-Based_Spray_Coating
- [18] BRAUN, Juergen H., Andrejs BAIDINS a Robert E. MARGANSKI. TiO₂ pigment technology: a review. *Progress in Organic Coatings*. 1992, roč. 20, č. 2, s. 105–138.
- [19] THE CHEMOURS COMPANY. Ti-Pure, Titanium Dioxide For Coatings. *Product Overview* [online] [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.tipure.com/en-/media/files/tipure/legacy/titanium-dioxide-for-coatings.pdf>
- [20] SCHRAMM, Laurier L. *Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. ISBN 3-527-30743-5.
- [21] WIDEGREN, Johnny a Lennart BERGSTRÖM. Electrostatic Stabilization of Ultrafine Titania in Ethanol. *Journal of the American Ceramic Society*. 2002, roč. 85, č. 3, s. 523–528.
- [22] KUO, Ming-Shu, Shinn-Jen CHANG, Ping-Hsun HSIEH, Yuan-Chang HUANG a Chia-Chen LI. Efficient Dispersants for TiO₂ Nanopowder in Organic Suspensions. *Journal of the American Ceramic Society*. 2016, roč. 99, č. 2, s. 445–451. ISSN 15512916.
- [23] YAREMKO, Z. M., N. H. TKACHENKO, C. BELLMANN a A. PICH. Redispergation of TiO₂ particles in aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2006, roč. 296, č. 2, s. 565–571. ISSN 00219797.
- [24] WOO, S.H., Min Ku LEE a Chang Kyu RHEE. Sedimentation Properties of TiO₂ Nanoparticles in Organic Solvents. *Solid State Phenomena*. 2007, roč. 119, s. 267–270.
- [25] FARROKHI-RAD, M. a M. GHORBANI. Stability of titania nano-particles in different alcohols. *Ceramics International*. 2012, roč. 38, č. 5, s. 3893–3900. ISSN 02728842.

- [26] SVOBODA, T. Suspenze oxidu titaničitého pro materiálový tisk. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. 2014, s. 45 Vedoucí bakalářské práce Ing.Petr Dzik, Ph.D.
- [27] LUCKHAM, Paul F a Michael A. UKEJE. Effect of Particle Size Distribution on the Rheology of Dispersed Systems. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1999, roč. 220, č. 2, s. 347–356.
- [28] SUTTIPONPARNIT, Komkrit, Jingkun JIANG, Manoranjan SAHU, Sirikalaya SUVACHITTANONT, Tawatchai CHARINPANITKUL a Pratim BISWAS. Role of Surface Area, Primary Particle Size, and Crystal Phase on Titanium Dioxide Nanoparticle Dispersion Properties. *Nanoscale Research Letters*. 2011, roč. 6, s. 1–8. ISSN 1931-7573.
- [29] LEFEBVRE, A. H. a V. G. MCDONELL. *Atomization and Sprays, Second Edition*. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017. ISBN 9781498736268.
- [30] AVVARU, Balasubrahmanyam, Mohan N. PATIL, Parag R. GOGATE a Aniruddha B. PANDIT. Ultrasonic atomization: Effect of liquid phase properties. *Ultrasonics*. 2006, roč. 44, č. 2, s. 146–158. ISSN 0041624X.
- [31] DEEPU, P., Chang PENG a Saeed MOGHADDAM. Dynamics of ultrasonic atomization of droplets. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018, roč. 92, s. 243–247. ISSN 08941777.
- [32] NAJLAH, Mohammad, Ishrat PARVEEN, Mohamed Albed ALHNAN, Waqar AHMED, Ahmed FAHEEM, David A. PHOENIX, Kevin M.G. TAYLOR a Abdelbary ELHISSI. The effects of suspension particle size on the performance of air-jet, ultrasonic and vibrating-mesh nebulisers. *International Journal of Pharmaceutics*. 2014, roč. 461, č. 1–2, s. 234–241. ISSN 03785173.
- [33] GHAZANFARI, Thu, Abdelbary M.A. ELHISSI, Zhiyi DING a Kevin M.G. TAYLOR. The influence of fluid physicochemical properties on vibrating-mesh nebulization. *International Journal of Pharmaceutics*. 2007, roč. 339, č. 1–2, s. 103–111. ISSN 03785173.
- [34] GOMEZ, Virginia, Silvia IRUSTA, Francisco BALAS a Jesus SANTAMARIA. Generation of TiO₂ Aerosols from liquid suspensions: Influence of colloid characteristics. *Aerosol Science and Technology*. 2013, roč. 47, č. 12, s. 1383–1392. ISSN 15217388.
- [35] BECK-BROICHSITTER, Moritz, Marie-Christine KNUEDELER, Werner SEEGER a Thomas SCHMEHL. Controlling the droplet size of formulations nebulized by vibrating-membrane technology. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2014, roč. 87, č. 3, s. 524–529. ISSN 18733441.
- [36] KUDO, Takahisa, Kazuhiko SEKIGUCHI, Kenshi SANKODA, Norikazu NAMIKI a Susumu NII. Effect of ultrasonic frequency on size distributions of nanosized mist generated by ultrasonic atomization. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017, roč. 37, s. 16–22. ISSN 18732828.
- [37] RUKOSUYEV, Maxym V., Oleksandr BARANNYK, Peter OSHKAI a Martin B.G. JUN. Design and application of nanoparticle coating system with decoupled spray generation and deposition control. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2016, roč. 13, č. 5, s. 769–779. ISSN 15470091.

- [38] RIOBOO, Romain, Cameron TROPEA a Marco MARENGO. Outcomes From a Drop Impact on Solid Surfaces. *Atomization and Sprays*. 2001, roč. 11, č. 2, s. 155–165. ISSN 1044-5110.
- [39] LEE, Sang Yong a Sang Uk RYU. Recent progress of spray-wall interaction research. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2006, roč. 20, č. 8, s. 1101–1117.
- [40] ZHANG, Yanzhi, Ming JIA, Hong LIU, Maozhao XIE, Tianyou WANG a Lei ZHOU. Development of anew spray/wall interaction model for diesel spray under PCCI-engine relevant conditions. *Atomization and Sprays*. 2014, roč. 24, č. 1, s. 41–80. ISSN 10445110.
- [41] MUNDO, Chr, M. SOMMERFELD a C. TROPEA. Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process. *International Journal of Multiphase Flow*. 1995, roč. 21, č. 2, s. 151–173. ISSN 03019322.
- [42] PANÃO, M. R.O. a A. L.N. MOREIRA. Experimental study of the flow regimes resulting from the impact of an intermittent gasoline spray. *Experiments in Fluids*. 2004, roč. 37, č. 6, s. 834–855. ISSN 07234864.
- [43] GUILDENBECHER, D. R., C. LÓPEZ-RIVERA a P. E. SOJKA. Secondary atomization. *Experiments in Fluids*. 2009, roč. 46, č. 3, s. 371–402. ISSN 07234864.
- [44] VALINASAB, Behzad. Atomization-based Spray Coating for Improved 3D Scanning. *University of Victoria*. 2014. Dostupné z: https://dspace.library.uvic.ca/bitstream/handle/1828/5417/Valinasab_Behzad_MASc_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [45] ĎURDINA, L. Measurement of Spray Characteristics Using Optical Measurement Methods. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2012, s. 81 Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [46] JEDELSKÝ, Jan a Miroslav JÍCHA. Spray characteristics and liquid distribution of multi-hole effervescent atomisers for industrial burners. *Applied Thermal Engineering*. 2016, roč. 96, s. 286–296. ISSN 13594311.
- [47] VUT FSI V BRNĚ. Fázový Dopplerovský anemometr Dantec Dynamics. [online] [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/fazovy-dopplerovsky-anemometr-dantec-dynamics>
- [48] CHAKER, Mustapha, Cyrus B. MEHER-HOMJI a Thomas MEE. Inlet fogging of gas turbine engines - Part II: Fog droplet sizing analysis, nozzle types, measurement, and testing. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2004, roč. 126, č. 3, s. 559–570. ISSN 07424795.
- [49] RUDOLF J. SCHICK (SPRAYING SYSTEMS CO.). Spray Technology Reference Guide: Understanding Drop Size. [online] [cit. 2020-01-03]. 2008. Dostupné z: https://www.spray.com/literature_pdfs/B459C_Understanding_Drop_Size.pdf
- [50] ICSTATION. 20mm 113KHz Ultrasonic Mist Maker Fogger Atomizer Ceramic Discs with Power Driver Board for Desktop Mini Humidifier. [online] [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <http://www.icstation.com/20mm-113khz-ultrasonic-mist-maker-fogger-atomizer-ceramic-discs-with-power-driver-board-desktop-mini-humidifier-p-11434.html>
- [51] INAIRCOM. FVM 0,01 μm 1/2" - 1 600. [online] [2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.inaircom.cz/produkt/U42016014>

- [52] KRONOS INTERNATIONAL INC. Kronos. *Kronos 2066 The ink grade* [online] [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <https://www.kronos2066.com/KRONOS2066-Flyer.pdf>
- [53] KRONOS WORLDWIDE INC. Kronos. *Grades and Applications Worldwide KRONOS Titanium Dioxide*. [online] [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <https://kronostio2.com/en/data-sheets-and-literature/brochures/send/2-brochures/81-grades-and-applications>
- [54] TRONOX. *Products: CR-826*. [online] [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.tronox.com/product/cr-826/>
- [55] PRECHEZA A.S. Pretiox UVS30. *Katalog*. [online] [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: https://www.precheza.cz/root/ke-stazeni/katalogy/uv_pharma_kveten_2017_screen.pdf
- [56] AGRIMEX. Bezpečnostní list. *AG Likal - lihový přípravek* [online] [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <http://www.agrimex.cz/data/catalogue/datasheet/1150100.pdf>
- [57] NANOBALA S.R.O. Bezpečnostní list. *Isopropylalkohol*. [online] [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: https://www.nanobala.cz/isopropanol_bezpecnostni_list.pdf
- [58] BYK. Disperbyk-2055. [online] [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <https://www.byk.com/en/additives/additives-by-name/disperbyk-2055.php>
- [59] BYK. Disperbyk-2155. [online] [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <https://www.byk.com/en/additives/additives-by-name/disperbyk-2155.php>
- [60] EPPENDORF. The 360° Evolution. *Eppendorf Combitips advanced*. [online] [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: https://www.eppendorf.com/uploads/media/Brochure_Combitips-advanced_The-360_-Evolution_kbs.pdf
- [61] Hustota ρ , kinematická viskozita vody ν a povrchové napětí σ v závislosti na teplotě při tlaku 10^5 Pa. [online] [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/Hya/ke_stazeni/cviceni/laboratore/tabulky.pdf
- [62] HÁLA, O. Měření povrchového napětí kapalin. *Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství*. 2017, s. 100 Vedoucí diplomové práce: Ing.David Košťál Ph.D.
- [63] NETME CENTRE - FSI VUT V BRNĚ. Laboratoř tribologie. [online] [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/tribology-laboratory/>
- [64] ŠEVČÍKOVÁ, P., V. KAŠPÁRKOVÁ, J. KREJČÍ a P. VLTAVSKÁ. DYNAMICKÝ ROZPTYL SVĚTLA V ANALÝZE KOLOIDNÍCH SYSTÉMŮ. *Chemické listy, Laboratorní přístroje a postupy*. 2014, roč. 108, s. 479–482.
- [65] SPOLEČNOST, Krystalografická. Dynamický rozptyl světla. [online] [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.xray.cz/kfkl-osa/eng/zetasizer/dls.htm>
- [66] MALVERN. ZETASIZER NANO Series. *PERFORMANCE, SIMPLICITY, VERSATILITY*. [online] [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: https://www.malvernpanalytical.com/en/assets/MRK1839_tcm50-17228.pdf
- [67] DANTEC DYNAMICS A/S. Measurement Principles of PDA. *Introduction* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-pda>

- [68] GOM. Atos Triple Scan. *Industrial Optical 3D Digitizer*. [online] [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: http://www.henindo.co.id/home/ATOS-Triple-Scan_EN_RevA.pdf
- [69] GOM. ATOS Triple Scan. *Industrial Optical 3D Digitizer* [online] [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>
- [70] BRONIARZ-PRESS, L., T. R. SOSNOWSKI, M. MATUSZAK, M. OCHOWIAK a K. JABŁCZYŃSKA. The effect of shear and extensional viscosities on atomization of Newtonian and non-Newtonian fluids in ultrasonic inhaler. *International Journal of Pharmaceutics*. 2015, roč. 485, č. 1–2, s. 41–49. ISSN 18733476.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam použitých zkratk

<i>3D</i>	trojrozměrný
<i>AGL</i>	ethanolový přípravek AG Likal
<i>CAD</i>	Computer-aided design
<i>CCD</i>	Charge-Coupled Device
<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics
<i>CMM</i>	souřadnicové měřicí zařízení (Coordinate Measuring Machine)
<i>CMOS</i>	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
<i>D2055</i>	Disperbyk 2055
<i>D2155</i>	Disperbyk 2155
<i>DLS</i>	Dynamic Light Scattering (dynamický rozptyl světla)
<i>DÚ</i>	divergentní ústí
<i>IEP</i>	izoelektrický bod (isoelectric point)
<i>IPA</i>	isopropylalkohol
<i>KR, Kronos</i>	titanová běloba Kronos 2066
<i>LDA</i>	Laser Doppler Anemometry (laserová Dopplerovská anemometrie)
<i>MKÚ</i>	mírné konvergentní ústí
<i>OA</i>	oleylamin
<i>OA_h</i>	kyselina olejová
<i>OKÚ</i>	ostré konvergentní ústí
<i>OLA</i>	oleyl alkohol
<i>OP</i>	oleyl fosfát
<i>PDA</i>	Phase Doppler Anemometry (fázová dopplerovská anemometrie)
<i>PDM</i>	Pendant Drop Meter
<i>PIV</i>	Particle Image Velocimetry
<i>PVÚ</i>	prodloužené válcové ústí
<i>RGB</i>	červená-zelená-modrá (Red-Green-Blue)
<i>TEA</i>	triethanolamin
<i>TiO₂</i>	oxid titaničitý
<i>TR, Tronox</i>	titanová běloba Tronox CR-826
<i>UV</i>	ultrafialový
<i>UVS, UVS30</i>	titanová běloba Precheza Pretiox UVS30
<i>VÚ</i>	Válcové ústí

9.2 Seznam použitých symbolů a veličin

A	Hamakerova konstanta
a	predikční koeficient
a_0	predikční koeficient
b	predikční koeficient
c	predikční koeficient
Ca	Kapilární číslo
D	průměr kapky
d	průměr kapky
d_1, d_2	velikost částic
D_{10}	Arithmetic Mean Diameter (AMD)
D_{30}	Volume Mean Diameter (VMD)
$Data Rate$	tok kapek
D_i	naměřený průměr kapky
g	gravitační zrychlení
H_0	rovnovážná vzdálenost mezi částicemi
k	Boltzmannova konstanta
K	parametr rozstříku
K	koeficient konzistence
La	Laplaceho číslo
m	hmotnost
n	index tokového chování
Oh	Ohnesorgeho číslo
p	přetlak hnacího proudu vzduchu
pH	vodíkový exponent
Q	objemový průtok
r	poloměr spreje
Ra	průměrná aritmetická úchylku profilu
Rc	průměrná výška profilu
Re	Reynoldsovo číslo
R_{nd}	bezrozměrná drsnost povrchu
$R\omega$	vlnitost povrchu
S	agregační koeficient
$Sigma$	standardní odchylka mračna bodů od referenční roviny
T	teplota
v	rychlost laterálního pohybu spreje (rychlost pojezdu)
V	objem
V, V_0	dopadová rychlost
V_A	energie přitažlivosti mezi částicemi

v_a, v_{axial}	axiální rychlost
v_{am}	průměrná axiální rychlost
V_B	kinetická energie Brownova pohybu
V_C	změna potenciální energie částic jejich pohybem vlivem přitažlivých sil
v_i	naměřená axiální rychlost kapky
v_m	střední axiální rychlost
We	Weberovo číslo
X, Y	ortogonální osy
Z	úťová vzdálenost
α	orientace referenční destičky při 3D skenování
γ	smykový spád
Θ_{rec}	ustupující kontaktní úhel
μ, η	dynamická viskozita
ν	kinematická viskozita
ρ	hustota
σ	povrchové napětí
τ	smykové napětí
τ_0	mez tečení

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Princip funkce atomizační nástřikové pistole.....	16
Obr. 2-1 Rozdělení metod 3D rekonstrukce – upraveno [2]	17
Obr. 2-2 a) Aktivní laserová triangulace b) Metoda strukturovaného světla- upraveno [2]	18
Obr. 2-3 a) Příklad chybových bodů při skenování lesklého kovového hranolu, b) Komponenty odraženého světla od lesklého kovového povrchu - upraveno [7]	19
Obr. 2-4 Způsoby odrazu světla [8]	20
Obr. 2-5 Rekonstrukce průhledného skleněného objektu běžnou metodou skenování, a) Skenovaný objekt, b) Výsledek skenování [10]	20
Obr. 2-6 Přehled metod nánosu povlaku na skenovaný objekt	21
Obr. 2-7 Intenzita odraženého světla pro různé počty nanesených vrstev [15].....	22
Obr. 2-8 Tloušťka povlaku naneseného pistolí na bázi atomizéru - upraveno [17]	23
Obr. 2-9 Porovnání naskenovaných dat a) Při nanesení povlaku sprejem, b) Při nanesení povlaku pistolí s atomizérem - upraveno [17].....	23
Obr. 2-10 Porovnání povlaků vytvořených atomizační a airbrushovou pistolí a) Velikost nanesené vrstvy v závislosti na překrytí, b) Odchylka naskenovaných bodů v závislosti na překrytí povrchu - upraveno [16].....	24
Obr. 2-11 Pigment s vyšším a nižším indexem lomu - upraveno [19]	25
Obr. 2-12 Závislost relativního rozptylu světla na velikosti TiO_2 částic [19].....	25
Obr. 2-13 Uzly nánosové pistole, které mohou ovlivnit nanesený zmatňující povlak	26
Obr. 2-14 Závislost smykového napětí a relativní viskozity na smykovém spádu pro různé koncentrace latexových částic a) Odchylka velikosti částic $\pm 42.4 \text{ nm}$ b) Odchylka velikosti částic $\pm 171 \text{ nm}$ – upraveno [27]	30
Obr. 2-15 Vliv velikosti primárních částic anatasového TiO_2 na zeta potenciál disperze při změně pH [28]	31
Obr. 2-16 Atomizéry - upraveno [29]	31
Obr. 2-17 Mechanismus formace kapek ultrazvukovou atomizací při různých výkonech vstupu - upraveno [70]	32
Obr. 2-18 Atomizéry s vibrující mřížkou - upraveno [33].....	32
Obr. 2-19 Závislost vytvořeného aerosolu na velikosti částic suspenze a typu atomizéru. [32]	33
Obr. 2-20 Střední objemový průměr aerosolových kapek v závislosti na velikostech částic suspenze a typu atomizéru - upraveno [32].....	34

Obr. 2-21 Závislosti velikosti kapek na vodivosti a dynamické viskozitě kapaliny - upraveno [35]	35
Obr. 2-22 Závislost režimu dopadu kapky na Weberově čísle - upraveno [39]	37
Obr. 2-23 Atomizační nánosová pistole s kolizním nebulizérem [44]	40
Obr. 2-24 Výsledný proud při různých polohách koncovky trysky hnacího media. Vlevo - tryska hnacího media vysazena z ústí. Uprostřed - koncovka trysky zároveň s ústím. Vpravo - koncovka trysky uvnitř ústí [37]	41
Obr. 2-25 Studie proudění, a) Hnací proud plynu vypnutý, b) Hnací proud plynu spuštěn [37]	42
Obr. 2-26 Příklad výsledků fázové Dopplerovské anemometrie. Vlevo schéma měřeného atomizačního zařízení. Uprostřed prostorový graf Sauterova středního průměru kapek. Vpravo prostorový graf střední rychlosti spreje. [46]	43
Obr. 4-1 Dílčí úkoly diplomové práce	50
Obr. 4-2 Vibrující membránový atomizér	51
Obr. 4-3 a) Původní podoba pistole, b) Nová podoba pistole	52
Obr. 4-4 a) Řez původní pistolí, b) Řez novou pistolí	53
Obr. 4-5 a) Původní uchycení atomizéru, b) Nové uchycení atomizéru	53
Obr. 4-6 Uchycení atomizéru s upraveným nátrubkem s odvodem kondenzátu	54
Obr. 4-7 Hlavní komora s vloženými závitovými vložkami	55
Obr. 4-8 Automatizované nástřikové zařízení	56
Obr. 4-9 Řetězec pro úpravu stlačeného vzduchu	56
Obr. 4-10 Koncovka mikropipety	61
Obr. 4-11 Pendant Drop Meter [62]	62
Obr. 4-12 Vlevo - Zetasizer Nano ZS, Vpravo - měřící cela	64
Obr. 4-13 Nastavení systému PDA, schéma (vlevo), hlavní parametry (vpravo)	65
Obr. 4-14 Geometrie CFD analýzy	68
Obr. 4-15 Geometrie trysek analyzovaných v rámci CFD, a) Válcové ústí (VÚ), b) Divergentní ústí (DÚ), c) Mírné konvergentní ústí (MKÚ), d) Ostré konvergentní ústí (OKÚ), e) Prodloužené válcové ústí (PVÚ)	69
Obr. 4-16 Převod snímku nástřiku do binárního prostoru (tmavé oblasti = povlak)	73
Obr. 4-17 Atos III Triple Scan na snímací sestavě Lift	74
Obr. 4-18 Princip aplikace zmatňujícího nástřiku na Johansonku	76

Obr. 4-19 Úhelník s příložkou.....	77
Obr. 5-1 Distribuce velikosti částic TiO_2 v jednotlivých suspenzích	81
Obr. 5-2 Průměrná axiální rychlost kapek ve spreji z ethanolového prostředku AG Likal v závislosti na poloměru spreje	84
Obr. 5-3 Průměrná axiální rychlost kapek ve sprejích z různých kapalin a suspenzí v závislosti na poloměru spreje	85
Obr. 5-4 Průměrná axiální rychlost kapek při vypnutém hnacím proudu vzduchu.....	85
Obr. 5-5 Porovnání predikčního modelu s daty z PDA pro přetlak hnacího proudu vzduchu $p = 1,5 \text{ bar}$	86
Obr. 5-6 Průběh průměru D_{10} pro spreje vytvořené z ethanolového prostředku AG Likal s různými přetlaky hnacího proudu vzduchu	87
Obr. 5-7 Distribuční funkce průměrů kapek pro sepnutý a vypnutý hnací proud vzduchu .	88
Obr. 5-8 Distribuční funkce průměrů kapek pro spreje vytvořené z IPA a AG Likal	89
Obr. 5-9 Průběh průměru D_{10} pro sprej z ethanolového prostředku AG Likal a IPA	90
Obr. 5-10 Průběh objemového průtoku spreje z ethanolového prostředku AG Likal v závislosti na poloměru spreje r a úst'ové vzdálenosti Z	91
Obr. 5-11 Fotografie spreje s detailem spreje v blízké úst'ové vzdálenosti (atomizovaná látka - suspenze <i>Kronos 2066 + AG Likal (1:4)</i> , použitý přetlak vzduchu $p = 0,5 \text{ bar}$).....	91
Obr. 5-12 Závislost axiálního Data Ratu kapek na přetlaku hnacího vzduchu pro sprej vytvořený z látky AG Likal.....	92
Obr. 5-13 Průběhy axiálního <i>Data Ratu</i> kapek pro spreje vytvořené látkami AG Likal a IPA	92
Obr. 5-14 Nestabilita na konci válcového ústí pistole při strhávání atomizované suspenze do hnacího proudu vzduchu s přetlakem 0,3 bar	93
Obr. 5-15 Sprej vytvořený pistolí s ostrým konvergentním ústím s přetlakem hnacího vzduchu 0,3 bar.....	93
Obr. 5-16 CFD analýza ústí nástřikové pistole pro přetlak hnacího proudu vzduchu 0,3 bar. a) Válcové ústí (VÚ), b) Ostré konvergentní ústí (OKÚ)	94
Obr. 5-17 Porovnání výsledků z CFD analýzy a měření rychlostí kapek na PDA.....	94
Obr. 5-18 Rychlost proudění vzduchu v ústí nánosové pistole – výsledky CFD analýzy ...	95
Obr. 5-19 Průměrné procentuální překrytí povrchu nástřikem po 1 přejezdu spreje, vytvořeného pistolí s válcovým (VÚ) a ostrým konvergentním ústím (OKÚ). Závislost průměrného překrytí na úst'ové vzdálenosti spreje (vlevo), závislost průměrného překrytí na velikosti přetlaku hnacího vzduchu (vpravo).....	98

Obr. 5-20 Nástřík provedený při nastavení: $p = 0,5 \text{ bar}$; $Z = 50 \text{ mm}$; 1 vrstva, průměr překryté oblasti $\approx 9 \text{ mm}$. Vycentrovaný sprej (vlevo), nevycentrovaný sprej (vpravo).....	99
Obr. 5-21 Výsledky 3D skenování. Závislost naskenované plochy na překrytí povrchu nástříkem (vlevo), Závislost směrodatné odchylky zachyceného mračna bodů vůči referenční rovině na naskenované ploše (vpravo).....	100
Obr. 5-22 Teoretický princip tvorby nástříku	101
Obr. 5-23 Vliv dynamické viskozity suspenze na % překrytí povrchu destičky pro 1 vrstvou nástříku	102
Obr. 5-24 Závislost překrytí povrchu nástříkem na počtu jeho vrstev pro různé suspenze	102
Obr. 5-25 Snímky nástříků provedených 1 přejezdem spreje z různých suspenzí. Nástříkové podmínky: $p = 0,5 \text{ bar}$; $Z = 50 \text{ mm}$; Tvar ústí – ostré konvergentní, (tmavé oblasti = povlak).....	103
Obr. 5-26 Profil nástříku vytvořeného ze suspenze <i>Kronos 2066 + AG Likal (1:4)</i> se 2 vrstvami	105
Obr. 5-27 Profil nástříku vytvořeného ze suspenze <i>TronoxCR-826 + AG Likal + 2 % D2055 (1:4)</i> se 2 vrstvami	106
Obr. 5-28 Profil nástříku vytvořeného ze suspenze <i>Precheza UVS30 + AG Likal + 3 % D2155 (1:4)</i> se 2 vrstvami	107
Obr. 5-29 Vliv suspenzí na 3D skenování. Závislost průměrné zachycené plochy na počtu vrstev nástříku pro orientaci skenování 0° (vlevo nahoře) a 45° (vpravo nahoře). Závislost průměrné směrodatné odchylky mračna bodů od referenční roviny na počtu vrstev nástříku pro orientaci skenování 0° (vlevo dole) a 45° (vpravo dole).....	108
Obr. 5-30 Vliv suspenzí a počtu vrstev nástříku na průměrnou výšku profilu	109
Obr. 5-31 Výsledky skenování nástříků s počtem vrstev 1, 2 a 6, aplikovaných na křemíkové destičce. Použitá suspenze: <i>Kronos 2066 + AG Likal (1:4)</i> . Podmínky nánosu: $Z = 50 \text{ mm}$; $p = 0,5 \text{ bar}$	109
Obr. 5-32 Výsledky skenování Johansonky o nominálním rozměru 50,00024 mm	110
Obr. 5-33 Výsledky skenování úhelníku s příložkou	111

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Chování světla na různých typech povrchů [6]	21
Tab. 2-2 Porovnání bílých pigmentů - upraveno [18].....	26
Tab. 2-3 Vlastnosti různých nosných kapalin suspenze s nanočásticemi TiO ₂ [24]	28
Tab. 2-4 Příklady způsobu dopadu kapky na pevný povrch - upraveno [38]	36
Tab. 2-5 Vliv vybraných parametrů na dopad kapky na pevný povrch - upraveno [38]	37
Tab. 2-6 Přehled bezrozměrných čísel	38
Tab. 2-7 Souhrnná tabulka hranic režimů dopadu pro dopad jediné kapky [42]	39
Tab. 2-8 Hraniční hodnoty Weberova čísla pro jednotlivé typy sekundární atomizace pro $Oh < 0,1$ [43]	40
Tab. 4-1 Použité titanové běloby	57
Tab. 4-2 Použité nosné kapaliny	57
Tab. 4-3 Použitá stabilizační aditiva	58
Tab. 4-4 Používané suspenze a nosné kapaliny	60
Tab. 4-5 Parametry rotačního viskozimetru Haake Rotovisco 1 [63]	63
Tab. 4-6 PDA - měřené pole spreje	66
Tab. 4-7 Plán měření PDA	67
Tab. 4-8 Objemové průtoky vzduchu	67
Tab. 4-9 Parametry pro studium vlivu procesních parametrů pistole	70
Tab. 4-10 Parametry křemíkové destičky	71
Tab. 4-11 Parametry dotykového profilometru Bruker DektakXT	71
Tab. 4-12 Parametry digitálního mikroskopu Keyence VHX-6000	72
Tab. 4-13 Parametry skeneru ATOS III Triple Scan [68]	73
Tab. 4-14 Parametry pro studium vlivu suspenzí na nástřik	75
Tab. 4-15 Parametry skenovací optiky MV170	76
Tab. 5-1 Výsledky - sedimentační test	79
Tab. 5-2 Průměrná velikost částic TiO ₂ v jednotlivých suspenzích	80
Tab. 5-3 Fyzikální vlastnosti použitých suspenzí	82
Tab. 5-4 Predikce režimu dopadu kapky ze suspenze <i>Kronos 2066 + AG Likal (1:4)</i>	96

Tab. 5-5 Výsledky měření nominální délky Johansonky z naskenovaných dat	110
---	-----

12 SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace

Název souboru	Název dílu
DP2020_01-00_NANOSOVA_PISTOLE	PISTOLE
DP2020_01-00_NANOSOVA_PISTOLE_KUSOVNIK_01	PISTOLE
DP2020_01-00_NANOSOVA_PISTOLE_KUSOVNIK_02	PISTOLE
DP2020_01-01_KOMORA_ZADNI	HLAVNÍ KOMORA
DP2020_01-02_KOMORA_HONEYCOMB	HONEYCOMB KOMORA
DP2020_01-03_KOMORA_USTI	REDUKČNÍ KOMORA
DP2020_01-04_USTI_KONVERGENTNI	ÚSTÍ – OKÚ
DP2020_01-05_NATRUBEK_ATOMIZERU	NÁTRUBEK
DP2020_01-06_DOMEK_ATOMIZERU_SILON2	SPOJOVACÍ ELEMENT
DP2020_01-07_MEZIKUS	DISTANČNÍ ELEMENT
DP2020_01-08_KRABICKA_DNO	KRABÍČKA – DNO
DP2020_01-09_KRABICKA_VIKO	KRABÍČKA – VÍKO
DP2020_01-10_SROUB_M6_DUTY	DUTÁ SPOJKA